

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

TOM 22

№ 1 2020
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с апреля 1999 г.

[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 ученый 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; vvg-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
Дегтярев 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, зав. кафедрой автомобильных дорог ТГАСУ; svefimenko_80@mail.ru; г. Томск
Ефименко С.В., докт. техн. наук, декан дорожно-строительного факультета 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
Иняхутов И.С., докт. техн. наук, профессор, директор инженерно-строительного института СФУ; iinzhutov@sfu-kras.ru, г. Красноярск
Князя 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
Кумляк О.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой 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, профессор, 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/>; «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

ВЕСТИНИК ТГАСУ № 1 – 2020

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)

ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств коммуникаций ПИ №77-9483 от 30 июля 2001 г.

Редакторы Т.С. Володина, Г.Г. Семухина.
Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.
Технический редактор Н.В. Удлер.
Подписано в печать 25.02.2020. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 15,03. Усл. печ. л. 17,85. Тираж 200 экз.
Зак. № 33.

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

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2020

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 22

№ 1 2020
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

[illegible]

EDITORIAL STAFF

1. Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Chief Editor, Head of Structural Mechanics Dept., TSUAB; lls@tsuab.ru, Tomsk, Russia
2. Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Chief Academic Secretary; pavel.akimov@gmail.com, Moscow, Russia
3. Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Director General Research Center StaDiO; amb@stadyo.ru, Moscow, Russia
4. 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
5. Chernyshov E.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Chairman of the Presidium of RAACS Central Regional Branch; chem@vgasu.vrn.ru, Voronezh, Russia
6. Chiaia B., PhD, Professor, Politecnico di Torino (Polytechnic University of Turin); bernardino.chiaia@polito.it, Turin, Italy
7. 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
8. Dzyubo V.V., DSc, Professor, Department of Water Supply and Sewage Systems, TSUAB; dzv1956@mail.ru, Tomsk, Russia
9. Efimenko V. N., DSc, Professor, Dean of Road Engineering and Construction Faculty, Head of Automobile Roads Dept., TSUAB; svefimenko_80@mail.ru, Tomsk, Russia
10. Efimenko S.V., DSc, Dean of Road Engineering and Construction Faculty, TSUAB; svefimenko_80@mail.ru, Tomsk, Russia
11. Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy); esaulovgv@raasn.ru, Moscow, Russia
12. Girardot M.C., DSc, Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; g.cennamo@uninettunouniversity.net, Roma, Italy
13. Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB; tsp_tgasu@mail.ru, Tomsk, Russia
14. Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President; ilyichev@raasn.ru, Moscow, Russia
15. Inzhutov I.S., DSc, Professor, Director School of Engineering and Construction, SibFU; iinzhutov@sfu-kras.ru, Krasnoyarsk, Russia
16. Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies Dept., TSUAB; kopanitsa@mail.ru, Tomsk, Russia
17. 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
18. Kudyakov A.I., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB (Tomsk, Russia); kudyakov@tsuab.ru
19. Kumpyak O.G., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB; kumpyak@yandex.ru, Tomsk, Russia
20. Lezhava I.G., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow Architectural Institute (State Academy); lezhavailia@gmail.com, Moscow, Russia
21. Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE; morozov@spbgasu.ru, St-Petersburg, Russia
22. Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB; ovsnn@tsuab.ru, Tomsk, Russia
23. Plachidi L.L., DSc, A/Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; luca.placidi@uninettunouniversity.net, Roma, Italy
24. 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
25. Pustovetov G.I., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Adviser Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts; pustovetovgi@gmail.com, Novosibirsk, Russia
26. Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; sjl1964@mail.ru, Novosibirsk, Russia
27. Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS; niisf@niisf.ru, Moscow, Russia
28. Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB; nac@tsuab.ru, Tomsk, Russia
29. Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician; travush@mail.ru, Moscow, Russia
30. Vlasov V.A., DSc, Professor, Rector, TSUAB; rector@tsuab.ru, Tomsk, Russia
31. Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB; vgg-tomsk@mail.ru, Tomsk, Russia
32. 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.lib.tomsk.ru>; <https://www.ebsco.com>; <https://cyberleninka.ru>; www.iprbookshop.ru; <https://vestnik.tsuab.ru>

Scientific Edition

VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 1 – 2020

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.

Editors T.S. Volodina, G.G. Semukhina
Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash
Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 25.02.2020. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman
Published sheets: 15,03. Conventional printed sheets: 17,85. Print run: 200 copies
Order N 33.

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, 2020

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Поляков Е.Н., Дончук Т.В. Последние творческие работы Эктора Жермена Гимара (ТГАСУ, г. Томск)	9
Шутка А.В., Гурьева Е.И. Градостроительная оптимизация структуры рекреационных территорий на примере сквера на ул. Депутатской г. Воронежа (ВГТУ, г. Воронеж)	31
Токарев А.Г. Особенности архитектурно-градостроительного решения жилого квартала рабочего кооператива «Трамвайщик» в Ростове-на-Дону (НИ МГСУ, г. Москва)	44
Смолина О.О. Арборскуulptура в визуально-коммуникационном пространстве города (НГАСУ, г. Новосибирск)	53
Резниченко Т.Ю. Проблемы сохранения печного отопления в деревянной застройке конца XIX – начала XX века в городе Томске (ТГАСУ, г. Томск)	63

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков стержней прямоугольного поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний (ТГАСУ, г. Томск, РААСН, г. Москва)	75
Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков полки стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний (ТГАСУ, г. Томск, РААСН, г. Москва)	92

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Волкова О.В., Первушина Д.М. Влияние пластифицирующих добавок на свойства газогипсовых материалов (ТГАСУ, г. Томск)	106
Немова Т.Н., Рекунов В.С., Цветков Н.А. Разрушение строительных материалов (кирпич, бетон, гранит) при высокотемпературном тепловом воздействии гетерогенных струй (ТГАСУ, г. Томск)	118
Сабитов Е.Е., Дюсембинов Д.С., Базарбаев Д.О. Исследование свойств композиции бетона с использованием полимерной эмульсии (ЕНУ, Республика Казахстан, г. Астана)	133

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Белоус А.Н., Оверченко М.В., Белоус О.Е. Разработка теплотехнического измерительного комплекса (ДонНАСА, г. Макеевка, ДНР)	140
---	-----

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ,
СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Вялкова Е.И., Глущенко Е.С., Велижанина Т.С., Осипова Е.Ю. Анализ физико-химических методов очистки бытовых сточных вод северных населенных пунктов (ТИУ, г. Тюмень, ТГАСУ, г. Томск).....	152
---	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Козловский В.Е., Городнова Е.В., Колмогорова С.С. Об осадках конструкций на комбинированных основаниях (ПГУПС, г. Санкт-Петербург).....	164
--	-----

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

Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Литвинова А.Е. Исследование течения битумного вяжущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе (ТГАСУ, НИ ТГУ, г. Томск).....	171
Каримов Э.М. Влияние водно-теплового режима на техническое состояние земляного полотна автомобильных дорог в условиях V дорожно-климатической зоны Кыргызстана (ОшТУ, Кыргызстан, г. Ош).....	193

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Polyakov E.N., Donchuk T.V. Final creative works of Hector Germain Guimard (Tomsk)	9
Shutka A.V., Gureva E.I. Urban optimization of recreation areas in Voronezh park at Deputatskaya street (Voronezh)	31
Tokarev A.G. Architectural and urban planning of residential settlement of cooperative society “Tramvayshchik” in Rostov-on-Don (Moscow).....	44
Smolina O.O. Tree shaping in visual communication of urban architecture (Novosibirsk)	53
Reznichenko T.Yu. Preservation of stove heating in a wooden house built in the 19–20th centuries in Tomsk (Tomsk).....	63

BUILDING AND CONSTRUCTION

Lyakyjvich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment criterion for optimum design solutions of piecewise constant sections in rods of rectangular cross-section with stability or first eigen-frequency limits (Tomsk, Moscow)	75
Lyakyjvich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment criterion for optimum design solutions of piecewise constant sections in rods of I-shaped cross-section with stability or first eigen-frequency limits (Tomsk, Moscow).....	92

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Anikanova L.A., Kurmangalieva A.I., Volkova O.V., Pervushina D.M. Gas-gypsum materials properties modified by plasticizing agents (Tomsk)	106
Nemova T.N., Rekunov V.S., Tsvetkov N.A. Destruction of building materials (brick, concrete, granite) under high-temperature evaporation of heterogeneous combustion products (Tomsk)	118
Sabitov E.E., Dusembinov D.S., Bazarbayev D.O. Concrete composition properties modified by polymer emulsion (Astana, Republic of Kazakhstan)	133

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

Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Portable heat metering system design (Makeevka)	140
--	-----

WATER SUPPLY, SEWERAGE,
BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Vialkova E.I., Glushchenko E.S., Velizhanina T.S., Osipova E.Y. Analysis of physicochemical wastewater treatment in Arctic zones (Tyumen, Tomsk)	152
--	-----

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Kozlovskii V.E., Gorodnova E.V., Kolmogorova S.S. Structure setting on composite-based soils (Saint-Petersburg)	164
---	-----

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

Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Litvinova A.E. Liquid asphalt binders in cylindrical tube in terms of the Ostwald-de Waele model (Tomsk)	171
Karimov E.M. Impact of water and temperature conditions on subgrade in road-building climatic zone V in Kyrgyzstan (Osh, Kyrgyz Republic)	193

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-9-30

*Е.Н. ПОЛЯКОВ, Т.В. ДОНЧУК,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ПОСЛЕДНИЕ ТВОРЧЕСКИЕ РАБОТЫ ЭКТОРА ЖЕРМЕНА ГИМАРА

Статья посвящена завершающему этапу архитектурно-дизайнерской деятельности Эктора Жермена Гимара (1867–1942), в ходе которого он был вынужден отказаться от своего уникального «стиля Гимар» (Le Style Guimar). В этот период в общественно-политической и культурной жизни Европы произошли кардинальные перемены. На смену «буржуазному» модерну пришли более лаконичные «демократичные стили» (функционализм, конструктивизм и др.). Не желая лишаться профессиональных заказов, французский зодчий стал создавать проекты, лишенные былой «гимаровской» пластики и «теплоты». Отмечено, что в канун Второй мировой войны он в основном занимался проектированием многоэтажных жилых зданий, изредка – декоративным оформлением их фасадов и интерьеров, элементов технического оборудования.

Рассмотрены его архитектурные проекты этого периода – жилой комплекс на Rue Jean de la Fontaine и Rue Agar (1910–1912 гг.), Дом Tremois на Rue François Millet (1909–1910 гг.), здание синагоги Agoudas Hakehilos на Rue Pavée (1913–1914 гг.) и др. Кратко освещены перипетии его жизни после отъезда в США (1938 г.), судьба его творческого наследия.

Ключевые слова: Франция; Эктор Жермен Гимар; наиболее известные дизайнерские и архитектурные работы 1910–1928 гг.

Для цитирования: Поляков Е.Н., Дончук Т.В. Последние творческие работы Эктора Жермена Гимара // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 9–30.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-9-30

*E.N. POLYAKOV, T.V. DONCHUK,
Tomsk State University of Architecture and Building*

FINAL CREATIVE WORKS OF HECTOR GERMAIN GUIMARD

The article concerns the final architectural and design activity of Hector Guimar (1867–1942), when he was forced to withdraw from his unique Guimar style. During this period, the socio-political and cultural life of Europe underwent fundamental changes. Bourgeois modernism was replaced by more laconic democratic styles (functionalism, constructivism, etc.). Not wanting to lose the professional orders, the French architect created projects without the former plastics and

warmth. It is noted that before the World War II, he was mainly engaged in the design of multi-storey residential buildings, occasionally, in decorative design of their facades and interiors, elements of technical equipment. His architectural projects of that period are residential complexes on Rue Jean de la Fontaine and Rue Agar (1910–1912), House Tremois on Rue François Millet (1909–1910), synagogue building Agoudas Hakehilos on Rue Pavée (1913–1914). Briefly considered the vicissitudes of his life after his departure to the United States (1938).

Keywords: France; Hector Guimar; famous design and architecture works.

For citation: Polyakov E.N., Donchuk T.V. Poslednie tvorcheskie raboty Ektora Zhhermena Gimara [Final creative works of Hector Germain Guimard]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 9–30.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-9-30

Настоящая статья завершает цикл наших работ, посвященных архитектурно-дизайнерскому наследию Гектора (Эктора) Жермена Гимара (1867–1942), создателя французской версии стиля модерн (Le Style Guimar) (рис. 1).



Рис. 1. Эктор Гимар (1867–1942) (URL: <https://images.collection.cooperhewitt.org/>; <https://radikal.ru/lfp/i034.radikal.ru/0802/43/9a99ddd434f4.jpg/htm>; <https://architects-byphotographers.files.wordpress.com/2014/01/guimard.jpg>)

Начальным этапам его творческой деятельности, охватившим конец XIX – начало XX столетия, были посвящены две наши статьи. В первой из них [1] было рассказано о начале профессиональной деятельности французского мастера, о его активных поисках своего собственного стиля в архитектуре и дизайне. Им стал Art Nuovea (модерн), с которым Э. Гимар познакомился в Бельгии. В ряде своих проектов, выполненных в конце XIX в. («Кастель Беранже», Дом Coilliot, станции Парижского метрополитена), он выработал и творчески апробировал основные принципы «стиля Гимар» (Le Style Guimar), которые затем усовершенствовал в 1900–1912 гг. Именно тогда им были созданы его лучшие архитектурно-дизайнерские произведения – Hôtel Guimard (1909–1912) и Hôtel Mezzara (1910–1911) [2]. Настоящая работа посвящена заключительному, самому тяжелому периоду жизни французского мастера, вынужденного кардинально поменять свои творческие планы и концепции. Пе-

чатных публикаций на эту тему не издано. Краткую информацию об этом удалось найти лишь в интернете [6–15]. В одной из этих публикаций нами был найден фрагмент, который довольно точно определил типологическую последовательность в творческой деятельности Э. Гимара: «Если где-то Европе есть город, где здания и разные предметы в стиле Art nouveau встречаются чуть ли не на каждом шагу, то это, конечно, Париж. Прежде всего, это привычные для парижан решетки и вывески у входов в метро – плоды трудов французского архитектора Эктора Гимара... И, конечно, построенные им изящные и гармоничные здания – это и особняки (увы, сохранились далеко не все), и *многоэтажные дома*...» [14]. То есть эта публикация в основном посвящена многоэтажным домам, украсившим парижские кварталы в 1910–1928 гг.

В 1910–1912 гг. Эктор Гимар реализовал *проект жилого комплекса*, расположенного на незначительном расстоянии от «Кастель Беранже». Этот комплекс занял целый квартал в XVI округе Парижа, ограниченный *улицами Жан-де-ла-Фонтейн* (Rue Jean de la Fontaine, 17, 19 и 21), *Агар* (Rue Agar, 8, 10 и 12) и *Гро* (Rue Gros, 43). В этом проекте автор постарался достичь композиционного единства жилого ансамбля как в общем градостроительном решении, так и в мельчайших архитектурно-композиционных аспектах каждого из зданий. Рассмотрим эти аспекты по порядку.

Расположение перечисленных выше зданий на генеральном плане участка неодинаково. Три блокированных шестиэтажных дома образуют ломаную дугу. Дуга начинается домом № 43, расположенным на ул. Гро (Rue Gros) (рис. 2).



Рис. 2. Главный фасад (а) и деталь (б) жилого дома № 43 по ул. Гро (Rue Gros) [10]

К нему под углом 45° примыкает дом № 17, относящийся к Rue Jean de la Fontaine. К правой части этого здания пристроено летнее кафе-бар, фасад и интерьер которого были выполнены по проекту Э. Гимара [11] (рис. 3).



Рис. 3. Фасад дома № 17 по Rue Jean de la Fontaine (а), его мансардный этаж (б); летнее кафе-бар (современное состояние) (в) [10, 11]

Третье звено «дуги», опять же развернутое под углом в 45° ко второму «звену», – дом № 19. Он визуально «обрезан» ул. Агар (Rue Agar), расположенной перпендикулярно к Rue Jean de la Fontaine (рис. 4).

Дом № 21 продолжает линию застройки ул. Жан-де-ла-Фонтейн на противоположной («правой») стороне ул. Агар (рис. 5, б, рис. 6).



Рис. 4. Видовая точка (а) и деталь (б) жилого дома № 19 по Rue Jean de la Fontaine [10]



Рис. 5. Видовая точка (правая сторона) (а) и деталь лестничной площадки (б) жилого дома № 21 по Rue Jean de la Fontaine [10]

Вдоль правой стороны Rue Agar возведено еще три шестиэтажных дома, выполненных по проекту Э. Гимара (Rue Agar, 8, 10 и 12) (рис. 7).



Рис. 6. Декоративные детали жилого дома № 21 по Rue Jean de la Fontaine [10]



Рис. 7. Улица Агар (Rue Agar). Жилые дома № 8, 10 и 12, выполненные по проектам Э. Гимара (1910–1911 гг.) [10]

«Улица Агар названа в честь французской актрисы Леониды Шервен, которая выступала под псевдонимом Агар («Tragedienne Agar»). Она жила в этом районе в 1870–1880 гг., о чем гласит эта надпись...» [11] (рис. 8).



Рис. 8. Посвятительная надпись в честь Л. Шервен (Агар) (а) [11]; табличка с названием ул. Агар (Rue Agar), выполненная в стиле модерн (2014 г.) (б) (URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Rue_Agar_\(Paris\)#/media/File:Paris_M%C3%A9morial_Agar.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Rue_Agar_(Paris)#/media/File:Paris_M%C3%A9morial_Agar.jpg))

Следует отметить, что в этом жилом ансамбле архитектор постарался не нарушить градостроительный закон «*Servitude d'alignement*», утвержденный еще Наполеоном I в 1801 г. Этот закон запретил строительство новых зданий или обновление старых за чертой улицы, обозначенной администрацией города (красной линией). Кроме того, все эти семь зданий имеют одинаковую этажность и выполнены в единой серо-бежевой гамме, которая в конечном счете и предопределила современный облик французской столицы. Темные кровли зданий служат мансардами. Здесь основоположник французского модерна послушно следует градостроительным канонам 1855–1870 гг., утвержденным префектом департамента Сена бароном Ж.Э. Османом (Georges Eugène Haussmann, 1809–1891) (рис. 9).

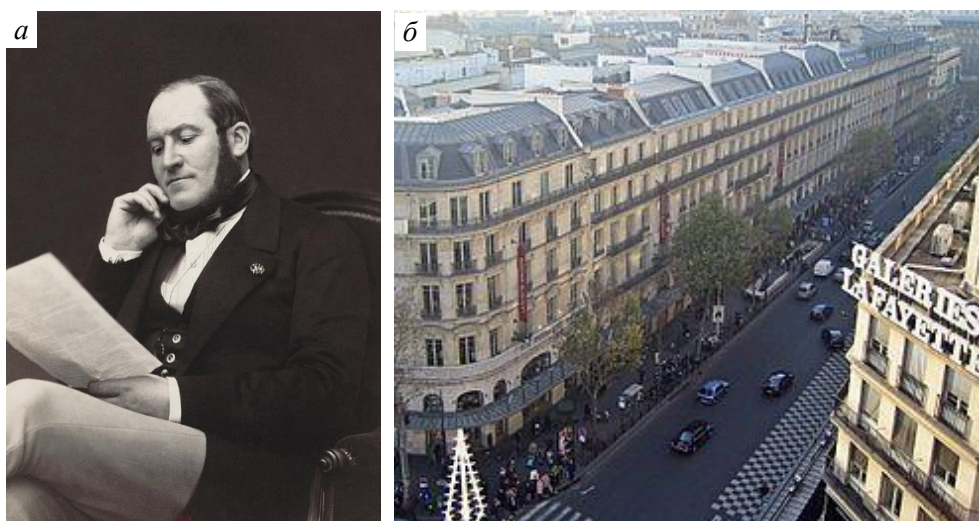


Рис. 9. Барон Жорж Эжен Осман (1809–1891) (а) и бульвар в Париже, названный его именем (б) (URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Осанизация_Парижа; [https://yandex.ru/search/?lr=67 &clid=1955451 &win=174&text=барон%20осман% 20википедия](https://yandex.ru/search/?lr=67&clid=1955451&win=174&text=барон%20осман%20википедия))

Очень похоже, что общественная критика его более ранних «сумасшедших» произведений («Кастель Беранже», станции метро и др.) была правильно понята архитектором и принята к сведению. Не желая лишаться заказов, энергичный «модернист» проявил должное уважение к градостроительным концепциям Ж.Э. Османа. Он научился гармонично вписывать свои архитектурные творения в уникальную застройку Парижа. «Эктор Гимар (к счастью!) был дитя века XIX, как, впрочем, и сам стиль *Art nouveau*. Поэтому даже “радикальные” постройки Гимара, как правило, хорошо вписывались в городскую среду. Париж, в котором начал строить Гимар, был в немалой мере подготовлен эпохой барона Османа, а собственные вкусы Гимара сложились под влиянием творчества бельгийского архитектора-новатора Виктора Орта...» [14].

В 1931 г. в каталоге к одной из своих парижских выставок знаменитый художник-сюрреалист Сальвадор Дали (1904–1989) написал следующее: «На ужасных улицах, съедаемых со всех сторон коррозией реальности, которую

современное искусство только поддерживает и усиливает, в современном Париже, быстро приобретающем индустриальные черты, ансамбли Гимара предстают перед нами как символ духовной стойкости...» [6].

Это стремление зодчего нашло свое выражение в композиционных решениях фасадов всех семи зданий. Они стали более сдержанными, лаконичными. Исчезли всякого рода символические сюжеты (человеческие фигуры и маски, изображения животных).

«Линии фасадов можно назвать даже строгими. Только окна обрамлены цветочным орнаментом. Чугунное литье балконных решеток выполнено по проекту Гимара...» [11].

«Гимар, по сути, аскетичен. В его внешней декоративной системе сочетаются два цвета – два материала. Светлая стена с пластичным декором, всецело ей принадлежащим: будто из стены вырастающим и в ней же исчезающим. Темный металлический орнамент дверных, оконных, балконных ограждений... И этого достаточно, потому что такая сдержанность – высший, чисто французский шарм, проявление самого высокого вкуса...» [9] (рис. 10).



Рис. 10. Фасад (а) и деталь (б) жилого дома № 10 по ул. Агар (Rue Agar) [10]

Изображения растений на балконных решетках, выполненные в более сдержанном варианте стиля «удар бича», окрашены в монохромные тона (темно-серый, синий, черный). «(Дом № 17 по Rue Jean de la Fontaine) выглядит... гораздо скромнее, чем «Замок Беранже», а основным декоративным элементом здесь стали балконные решетки...» [11] (рис. 11).



Рис. 11. Балконные решетки дома № 17 по Rue Jean de la Fontaine [10]

Также более лаконичной стала «текучая» фигурная резьба, украшающая каменные обрамления оконных и дверных проемов. В то же время Эктор не отказался от своих фирменных «волнистых» балконов, эркеров, карнизов, опорных консолей. «Пластические, текучие формы обрамляют в этих зданиях не только оконные и дверные проемы, украшенные лаконичным растительным орнаментом. Также особенностью этого комплекса зданий являются сглаженные углы...» [7] (рис. 12).



Рис. 12. Каменные декоративные детали дома № 10 по Rue Agar [10]

Зодчий стал больше внимания уделять дизайну технических элементов: дымоходов и вентиляционных шахт, газовых и водосточных труб (рис. 13).



Рис. 13. Газовая труба между домами № 10 и 12 по Rue Agar [10]

Еще один многоквартирный дом, построенный Э. Гимаром в этот же период (1909–1910 гг.), – *Дом Tremois на ул. Франсуа Милле, 11 (Rue François Millet, 11)*. Это здание расположено недалеко от рассмотренных выше семи зданий. Оно стоит на довольно узкой и тесной улице. Поэтому Г. Гимар в оформлении его серо-бежевых фасадов отошел от присущей модерну монументальности. Зато он постарался максимально увеличить размеры окон, чтобы в жилые помещения попадало как можно больше света [8] (рис. 14, 15).



Рис. 14. Дом Tremois (г. Париж, ул. Франсуа Милле, 11, 1909–1910 гг.) (а); главный фасад (б) [10]



Рис. 15. Дом Tremois (г. Париж, ул. Франсуа Милле, 11, 1909–1910 гг.) (а); декоративные детали главного фасада (б) [10]

Благодарные парижане не остались перед Эктором Гимаром в долгу. Ныне все уцелевшие здания и сооружения, выполненные по его проектам, украшены надписями, выполненными в стиле Art nouveau. В них упомянуты имя их создателя и годы постройки (рис. 16).

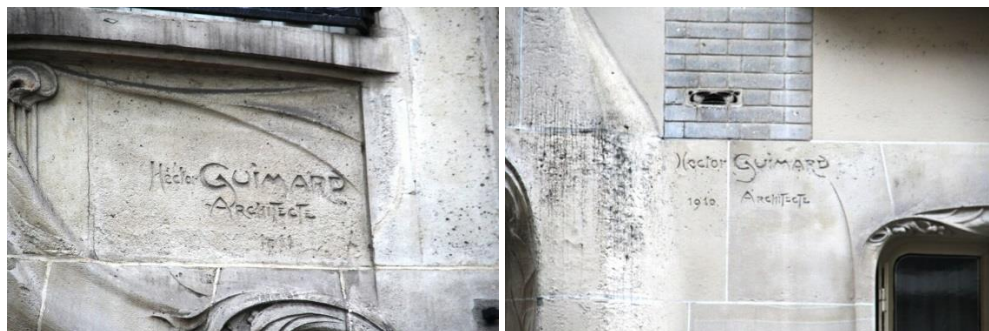


Рис. 16. Имя Э. Гимара на фасадах жилых домов по Rue Jean de la Fontaine, 17 (слева) и Rue François Millet, 11 (справа) [10]

То есть Париж стал для Эктора Гимара не просто творческой лабораторией и мастерской, но и монументальным архивом его лучших архитектурных и дизайнерских произведений. «Эктор Гимар полнее всех осуществил концепцию стиля Art nouveau во Франции. В несколько смягченной форме его последователи воздвигли немалую часть известного нам сегодня многоэтажного Парижа...» [14].

В 1910 г. Эктор Гимар получил свой первый и, как оказалось, единственный заказ на проект культового здания – **синагоги Agoudas Hakehilos на улице Паве** (Rue Pavée, 10) в квартале Марэ (IV округ Парижа, 1913–1914 гг.). В этом проекте ему удалось реализовать модернистский принцип «жемчужной раковины», которому следовали в своем творчестве Ч.Р. Макинтош [3, 4] и В. Орта [5]. Стремясь сделать это здание незаметным в уже сложившейся застройке Парижа, Гимар решил фасады достаточно лаконично, основное внимание уделив его внутреннему пространству.

Заказчиком тут выступил Agoudas Hakehilos («Союз общин») – ассоциация девяти еврейских иммигрантских обществ, которые в начале XX в. прибыли во Францию из Польши и Российской империи. Члены этого сообщества, возглавляемого Дж. Ландау, поселились в квартале Марэ (*фр.* Marais, «Болото») [13]. Деньги на строительство синагоги собирали из частных пожертвований. Службы в завершенном храме начались в октябре 1913 г., а его торжественное открытие состоялось 7 июня 1914 г. Через 75 лет (4 июня 1989 г.) синагога Agoudas Hakehilos была объявлена историческим памятником и объектом культурного наследия Франции [15].

Почему этот заказ был поручен именно Э. Гимару? Тут возможны два объяснения. Во-первых, это был опытный профессионал, знаток градостроительной политики Парижа, создатель оригинального архитектурного стиля. Поэтому ему было поручено сделать здание синагоги как можно более «незаметным» в окружающей застройке, чтобы не привлекать излишнего внимания

и не раздражать столичных обывателей. Во-вторых, жена Э. Гимара, Аделина Оппенхайм, происходила из семьи богатых американских евреев и вполне могла оказать влияние на мужа.

Градостроительная ситуация на Rue Pavée¹, 10, была традиционной для эпохи модерна. Здание синагоги оказалось «втиснуто» между двумя соседними зданиями, став частью блокированной застройки. «Зажатые между строениями других времен, овеянные мистической грустью, дома ар-нуво грезят о несбывшихся идеалах символизма. Среди шума современных городов они – позабытые гости из несостоявшегося счастливого будущего человечества. Безмолвные свидетели того, как завершилась последняя и самая современная сказка Европы...» [9] (рис. 17).



Рис. 17. Синагога Agoudas Hakehilos на Rue Pavée, 10 (1913–1914 гг.) (URL: <https://www.sortiraparis.com/images/54/77153/378162-histoire-de-la-synagogue-de-la-rue-pavee-agoudas-hakehilos-2.jpg>)

Ее изящный железобетонный каркас скрыт за стеной из светлого агломерированного камня (соединение природного кварца и полиэфирной смолы). Ширина главного фасада – 5 м, глубина здания – 23 м, а его высота – 12 м. Боковые стены лишены окон. В этих условиях многие архитекторы-модернисты пытались освещать внутреннее пространство с помощью световых колодцев. Освещение интерьеров синагоги также решено с помощью гирлянды прямоугольных потолочных окон и узкого эркера, расположенного

¹ Rue Pavée (фр. «мощеная улица») – единственная транспортная артерия в квартале Маре, которая в XIII в. была вымощена камнем.

на ее заднем фасаде. Функционально-планировочная схема храма достаточно четкая. Она включает три группы помещений, предназначенных для молитв, собраний и учебы. «Библиотека и учебные комнаты расположены в передней части здания, а святилище сзади... Два этажа *мезонинов* (галерей. – П.Е.) обрамляют центр, где свет проникает через ряд потолочных окон и большой эркер в задней части...» [15] (рис. 18).

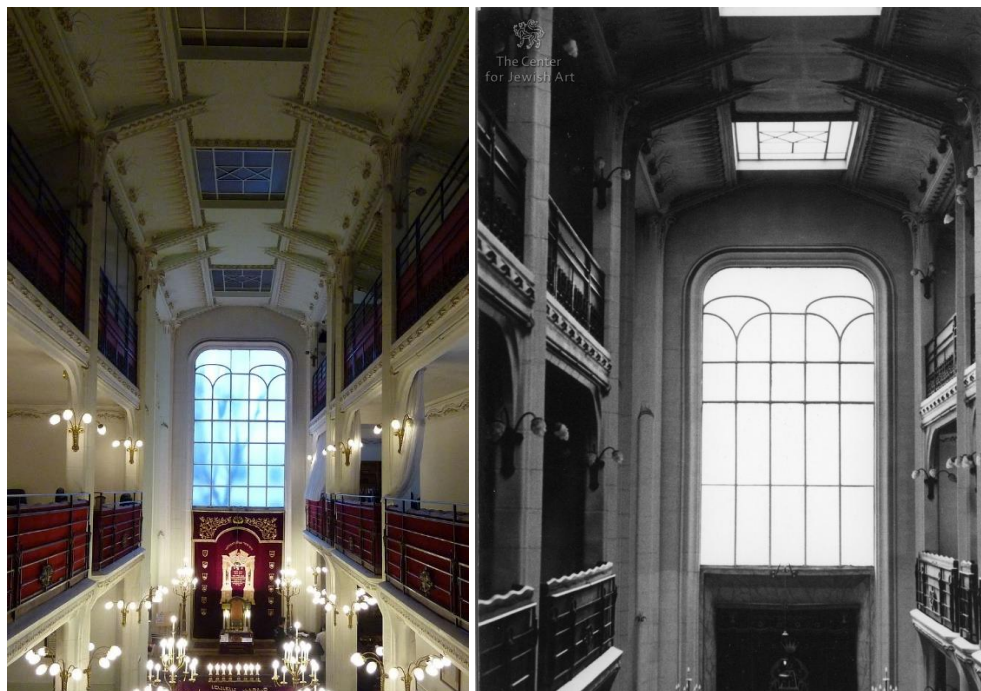


Рис. 18. Интерьер молитвенного зала синагоги (URL: http://insideinside.org/wp-content/uploads/2017/01/800px-Paris_Synagogue_RuePav%C3%A9_innen399.jpg)

Криволинейный, «вдавленный внутрь» главный фасад увенчан изящным криволинейным козырьком. Под ним помещены скульптурные изображения скрижалей Завета. Да и в целом фасад «напоминает открытую книгу, увенчанную табличками с Десятью Заповедями...» [Там же]. Он рассечен по вертикали десятью узкими оконными проемами и изящными пилястрами, напоминающими трубы музыкального органа. Этим приемом Э. Гимар, опять же следуя «готическим» принципам Э.Э. Виолле-ле-Дюка, усилил «вертикализм» фасада, его «устремленность в небо». Здесь нет уже кованых металлических решеток, характерных для архитектуры раннего модерна: «Его спокойная простота говорит о сдержанности стиля 1920-х годов...» [Там же] (рис. 19).

Традиционно следуя принципам «тотального дизайна», Э. Гимар запроектировал не только само здание, но и его металлическую ограду, а также все его внутреннее убранство – от светильников и скамей до дверных ручек. Здесь он вновь следует заповедям Э.Э. Виолле ле Дюка: «В архитектуре же искусство состоит именно в том, чтобы облечь всякий предмет в формы, под-

ходящие к этому предмету, а не в том, чтобы построить монументальную коробку и задним числом ломать себе голову, как расположить предметы в этой коробке...» [9]. В решении интерьеров синагоги Э. Гимар соблюдает «принцип непрерывности»: «В них отдельные предметы возникают только там, где их появление оправданно. Мебели Гимара свойственны линейные композиции, в которых прямые линии, прорастая, становятся криволинейными. В результате возникает целое, отличающееся гармоничностью – высшим художественным качеством окружающей человека среды...» [9].



Рис. 19. Главный фасад синагоги (а); скрижали Завета (б) (URL: <http://www.goodmorningparis.fr/wp-content/uploads/2015/05/Jewish-area-Marais-Paris-Synagogue-Guimard-rue-Pavee.jpg>)

«Освещение обеспечивается лампами, канделябрами и бра его конструкции. Волнистые спинки скамеек повторяют движение фасада, их декор повторяет его орнаментацию. Растительные мотивы украшают чугунные ограждения, а мотивы, изваянные в посохе, встречаются на стенах и потолках...» [15] (рис. 20).

В ночь со второго на третье октября 1941 г., когда иудеи праздновали Йом-Киппур (десятый, «судный день» покаяния и отпущения грехов), немецкие оккупанты и их приспешники устроили теракты во всех шести синагогах Парижа. Стены Agoudas Nakehilos тогда устояли, но интерьеры ее были сильно повреждены. Их удалось восстановить уже после войны. Тогда же парадный вход (портал) синагоги был украшен Звездой Давида (рис. 21).



Рис. 20. Интерьер и декоративные украшения молитвенного зала синагоги (URL: <http://cja.huji.ac.il/image.php?id=240405&m=medium>)



Рис. 21. Парадный вход синагоги (а); Звезда Давида над входом (б) (URL: <http://ttnotes.com/images/pont-du-gard-pont-du-gard-6.jpg>; <http://lh5.ggpht.com/FsUSeaCnqJc-bmXwXoAhorLaTjdeBWIE4MUWQj7glYIw94poHa20fyCyFpa2xsuyhPGdkuid1eEXV70c>)

До начала Второй мировой войны Гимар продолжал вести активную жизнь практикующего архитектора. Он построил в Париже и во многих других городах Франции довольно много зданий. Однако далеко не во всех этих постройках ему удавалось реализовать свой уникальный стиль, поскольку в архитектуре, как и в общественной жизни европейских стран, в этот период произошли кардинальные изменения. «Фактически Art nouveau “похоронила” Первая мировая война. Но по существу, он довольно быстро изживал себя, поскольку тиражируемость превращает этот стиль в китч, а уникальные изделия, выполненные в “настоящем” Art nouveau, были слишком дороги, чтобы стать массовыми...» [14]. На смену «буржуазному» модерну пришли более «демократичные» конструктивизм и функционализм с их прямоугольными «минималистическими» объемами и более лаконичной цветовой гаммой. Эктор Гимар старался учесть эти новые веяния в мировой архитектуре.

В 1920-е гг. он создал несколько проектов, совершенно отличных от его ранних творений. Очень похоже, что эти проекты стали завершающим этапом в творческой деятельности Эктора Гимара. «Модерн умер, отправлен в небытие. Здания из кирпича и камня безупречны, но в них уже нет той теплоты...» [8]. К сожалению, нам не удалось найти более подробную информацию об этих работах, поэтому ограничимся пока иллюстрациями (рис. 22–24).

О дальнейшей жизни Эктора Гимара и его семьи известно немного. Анализ самых различных источников показал, что свои последние проекты он завершил в конце 20-х гг. прошлого столетия, будучи уже в преклонном возрасте. В канун Первой мировой войны было разрушено несколько особняков, выполненных по его проектам, а в 1930-е гг. в Париже были уничтожены три десятка входных павильонов станций метрополитена. Не подлежит сомнению,

что он очень тяжело пережил все эти удары судьбы. В 1938 г., не дожидаясь начала Второй мировой войны, он со своей семьей уехал в США. Они поселились в Нью-Йорке, в котором проживали родственники Аделины Гимар. Эктору не удалось здесь заняться архитектурно-дизайнерской практикой. Дело в том, что европейский модерн был не в чести у сторонников «новой» и «органической» архитектуры. Да и профессиональная конкуренция здесь была очень высокой. Ведь в США, помимо своих собственных зодчих (Ф.Л. Райт и др.), работало немало талантливых эмигрантов (А. Аалто, Л. Мис ван дер Роэ, Э. Сааринен и др.). Наверняка Гимара опечалили известия о захвате немцами Парижа 14 июня 1940 г., о разрушении синагоги на Rue Pavée и многих других его творений. Покинув родину, основатель французского модерна был надолго забыт своими соотечественниками. 20 мая 1942 г. в возрасте 75 лет Э. Гимар умер в нью-йоркском отеле «Адамс». Похоронен он в воротах Небесного кладбища селения Хоторн (штат Нью-Йорк), примерно в 25 милях к северу от Нью-Йорка.



Рис. 22. Особняк на пл. Жасмин, 3 (1922 г.) [6]

Что же произошло с его творческим наследием?

«Спустя шесть лет после смерти мужа, в 1948 году, его вдова захотела передать дом («Hotel Guimard». – П.Е.) со всеми интерьерами и мебелью, также спроектированными Гимаром, в подарок г. Парижу с целью создания музея. Однако Париж отказался, и в итоге дом сейчас в плачевном состоянии. Музея Гимара в городе так до сих пор и нет, и лишь часть мебели сохранилась (кое-что можно увидеть в Малом дворце Пти-Пале), все остальное было распродано на аукционе...» [12]. Оригинальные архитектурные чертежи Гимара сейчас хранятся в архиве архитектурно-художественной библиотеки Avery при Колумбийском университете в Нью-Йорке.



Рис. 23. Здание на ул. Гейне, 18 (1926 г.) [8]



Рис. 24. Здание на пр. Моцарта, 120 (1924–1927 гг.) [8]

Только в 1960-х гг. возродился интерес к Э.Ж. Гимару и его творческому наследию: «Многие исследователи в области архитектуры долгое время изучали и восстанавливали его биографию и основные этапы творчества. Однако большинство построек Гимара все же остаются недоступными для публики...» [8].

В заключение можно сделать ряд выводов, касающихся завершающего этапа архитектурно-дизайнерской деятельности Эктора Жермена Гимара (1910–1928 гг.).

1. Анализ самых различных публикаций, посвященных истории модерна, показал, что в канун Первой мировой войны в общественно-политической и культурной жизни Европы произошли кардинальные перемены. На смену модерну (*Art Nouveau*) пришли более лаконичные «демократичные стили» (функционализм, конструктивизм и др.). Дорогостоящий «буржуазный» стиль утратил былую популярность и «был отправлен в небытие». Избегая общественной критики и не желая лишаться профессиональных заказов, Э. Гимар был вынужден значительно упростить декоративную составляющую своих объектов. Они лишились былой «гимаровской теплоты» и пластики, стали менее заметными в уже сложившейся застройке французской столицы.

2. Отмечено, что в канун Второй мировой войны Э. Гимар в основном занимался проектированием многоэтажных жилых зданий, изредка – декоративным оформлением их фасадов и интерьеров, элементов технического оборудования. Рассмотрены его архитектурные проекты этого периода – жилой комплекс на Rue Jean de la Fontaine и Rue Agar (1910–1912 гг.), Дом Tremois на Rue François Millet (1909–1910 гг.) и др. Анализ стилистики их декоративных украшений показал, что в этот период действительно произошел переход европейской архитектуры к более лаконичным, упрощенным стилям. Очень похоже, что основоположник французского модерна в этих постройках не имел возможности в полной мере продемонстрировать свой талант «флореального» дизайнера, достойного ученика Э.Э. Виолле-ле-Дюка и В. Орта.

3. Некоторую свободу от «новых веяний» в архитектуре начала XX столетия Э. Гимар получил в проекте здания синагоги Agoudas Hakehilos на Rue Pavée (1913–1914 гг.). Конечно же, и здесь его творческая свобода была ограничена требованиями иудейского канона, довольно умеренным финансированием (строительство храма велось на частные пожертвования членов ассоциации «Союз общин» – Agoudas Hakehilos), а также нежеланием заказчиков привлекать к храму излишнее внимание. Поэтому, выполнив достаточно лаконичными фасады храма, автор максимально раскрыл свой талант «тотального дизайнера» в разработке уникальной планировочной структуры здания, в оформлении его интерьеров, мебели и оборудования.

4. Кратко рассмотрены основные причины отъезда Э. Гимара и его семьи в США (1938 г.), судьба его творческого наследия. К огромному сожалению, очень долгое время имя легендарного французского архитектора находилось в забвении, по крайней мере в нашей стране оно не было упомянуто ни в одном печатном научном издании. Отмечено, что лишь в 1960-е г. во Франции возник интерес к биографии и творчеству Э.Ж. Гимара. Серия наших ста-

тей, посвященных этому зодчему, продиктована желанием хотя бы частично восполнить этот пробел.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков Е.Н., Дончук Т.В. Зарождение стиля модерн в архитектуре Франции (кон. XIX в.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 5. С. 9–35.
2. Поляков Е.Н., Дончук Т.В. Творческие работы Эктора Гимара (1867–1942) начала XX столетия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 9–29.
3. Поляков Е.Н., Дончук Т.В. Шотландская версия стиля модерн в дизайнерских работах Ч.Р. Макинтоша и М. Макдональд // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 9–34.
4. Поляков Е.Н., Дончук Т.В. Архитектурное наследие Ч.Р. Макинтоша // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 6. С. 9–32.
5. Поляков Е.Н., Дончук Т.В. Архитектурное наследие Виктора Орта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 29–59.
6. *Ар нуво*. Причудливый мир Гимара. URL: <http://interior.lv/ru/brinumaina-gimara-pasaule/>
7. *Ар-нуво* в Париже. Исцеление красотой. URL: <https://turbina.ru/guide/Parizh-Frantsiya-118086/Zametki/Ar-nuvo-v-Parizhe-Istselenie-rasotoy-70002/>
8. *Архитектор и дизайнер* Эктор Гимар (Hector Guimard). URL: https://www.liveinternet.ru/users/stroitelstvo_remont_piter/post206467476
9. *Европейский модерн*: Париж – «Стиль Гимара». URL: <https://mif-medya.ru/2016/>
10. *Париж*. Дома Эктора Гимара. URL: <https://babs71.livejournal.com/956922.html>
11. *Париж*. «Кастель Беранже» и другие здания архитектора Эктора Гимара. URL: <https://nathalie-zh.livejournal.com/134119.html>
12. *Парижский модерн*. URL: <http://www.maybeeabroad.com/2016/01/paris-modern.html>
13. *Синагога на рю Паве*, Париж. URL: <https://lord-k.livejournal.com/272582.html>
14. *Эктор Гимар* и его архитектурные фантазии. URL: <http://trv-science.ru/2015/06/30/hector-guimard-i-ego-arkhitekturnye-fantazii/>
15. *The Synagogue on the Rue Pavée*. URL: <https://bonjourparis.com/uncategorised/synagogue-rue-pavee/>

REFERENCES

1. Polyakov E.N., Donchuk T.V. Stanovlenie frantsuzskoi versii stilya modern v rannikh rabotakh Ektora Gimara (1891–1912 gg.) [Formation of french art nouveau style in early works of Hector Guimard (1891–1912)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 5. Pp. 9–35. (rus)
2. Polyakov E.N., Donchuk T.V. Tvorcheskie raboty Ektora Gimara (1867–1942) nachala XX stoletiya [Hector Guimard's works at the beginning of the 20th century]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 6. Pp. 9–29. (rus)
3. Polyakov E.N., Donchuk T.V. Shotlandskaya versiya stilya modern v dizainerskikh rabotakh Ch.R. Makintosha i M. Makdonal'd [Scottish modern in design works of C.R. Mackintosh and M. MacDonald]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 5. Pp. 9–34. (rus)
4. Polyakov E.N., Donchuk T.V. Arkhitekturnoe nasledie Ch.R. Makintosha [Architectural heritage of C.R. Mackintosh]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 6. Pp. 9–32. (rus)
5. Polyakov E.N., Donchuk T.V. Arkhitekturnoe nasledie Viktora Orta (1861–1947) [Architectural heritage of Victor Horta (1861–1947)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 29–59. (rus)

6. Ar-nuvo. Prichudlivy mir Gimara [Art Nouveau. Bizarre world of Guimar]. Available: <http://interior.lv/ru/brinumaina-gimara-pasaule/>
7. Ar-nuvo v Perije. Istselenie krasotoy [Art Nouveau in Paris. Healing by beauty]. Available: <https://turbina.ru/guide/Parizh-Frantsiya-118086/Zametki/Ar-nuvo-v-Parizhe-Istselenie-crasotoy-70002/>
8. Arhitektor i dizainer Ektor Gimar (Hector Guimard) [Architect and designer Hector Guimard]. Available: www.liveinternet.ru/users/stroitelstvo_remont_piter/post206467476
9. Evropeisky modern: Parij – Stil Gimara [European Art nouveau: Paris as a Guimard style]. Available: <https://mif-medya.ru/2016/>
10. Parij. Doma Ektora Gimara [Paris. Hector Guimard's Houses]. Available: <https://babs71.livejournal.com/956922.html>
11. Parij. Kasteli Berange i drugie zdaniya arhitektora Ektora Gimara [Paris. Castel Beranger and other buildings by architect Hector Guimard]. Available: <https://nathalie-zh.livejournal.com/134119.html>
12. Parizhskii modern [Parisian modern]. Available: www.maybeeabroad.com/2016/01/paris-modern.html
13. Sinagoga na riu Pave, Parij [Synagogue on the Rue Pave, Paris]. Available: <https://lord-k.livejournal.com/272582.html>
14. Ektor Gimar i ego arhitekturnye fantazii [Hector Guimard and his architectural fantasies]. Available: <http://trv-science.ru/2015/06/30/hector-guimard-i-ego-arkhitekturnye-fantazii/>
15. The Synagogue on the Rue Pavée. Available: <https://bonjourparis.com/uncategorised/synagogue-rue-pavee/>

Сведения об авторах

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

Дончук Татьяна Владимировна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kapitel-nsk@mail.ru

Authors Details

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

Tat'yana V. Donchuk, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kapitel-nsk@mail.ru

УДК 711.581.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-31-43

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

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ РЕКРЕАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ СКВЕРА НА УЛ. ДЕПУТАТСКОЙ Г. ВОРОНЕЖА

Рекреационные территории г. Воронежа требуют градостроительной оптимизации для создания комфортных условий для жизни граждан в связи с физическим и моральным износом элементов благоустройства, насаждений.

Цель настоящих исследований – анализ и оценка состояния насаждений сквера на ул. Депутатской в процессе градостроительной оптимизации и исследование ландшафтно-планировочной структуры рекреационной территории для научного обоснования создания устойчивых адаптивных систем озеленения. В связи с поставленной целью алгоритм научного исследования включает последовательность мероприятий по проведению комплексно-аналитических процессов, натурных и камеральных работ с заключительным этапом – моделью-концепцией обновленной территории по принципам градостроительной оптимизации.

В статье рассмотрены результаты архитектурных принципов оптимизации структуры рекреационных территорий методами градостроительного проектирования. Определены основные концептуальные подходы. Установлено, что предпроектная деятельность, предполагающая взаимосвязанное решение задач градостроительного проектирования и выявления потенциальных ключевых объектов, а также определение туристской функции объекта может существенно улучшить уровень и качество жизни населения города.

Ключевые слова: архитектурные принципы; общественные пространства; градостроительство; город; градостроительная оптимизация; сквер; рекреация; градостроительное проектирование.

Для цитирования: Шутка А.В., Гурьева Е.И. Градостроительная оптимизация структуры рекреационных территорий на примере сквера на ул. Депутатской г. Воронежа // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 31–43.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-31-43

*A.V. SHUTKA, E.I. GUREVA,**Voronezh State Technical University*

URBAN OPTIMIZATION OF RECREATIONAL AREAS IN VORONEZH PARK AT DEPUTATSKAYA STREET

Recreational areas of Voronezh require urban optimization to create comfortable living conditions for citizens by the reason of physical and moral wear of elements of amenities and plantings.

The purpose of this paper is to analyze and evaluate plantings on the Deputatskaya street in optimizing the urban development and the landscape-planning structure for the scientific justification for the creation of adaptive landscaping systems. The research algorithm includes the sequence and parallelism of activities for conducting complex analytical processes, field and cameral works, and a model-concept of the territory improved according to the principles of urban optimization.

The paper discusses the results of architectural principles for optimizing recreational area using urban planning methods. The main conceptual approaches are identified. It is shown that pre-

project activities for the development of adaptive, kind of statement hypothesis involving the interconnected solution of urban planning problems, identifying potential key objects, building targeted walking routes as well as determining the tourist function, the geographical boundaries, etc., such optimization can significantly improve the level and quality of life in the city.

The article discusses the results of architectural principles for optimizing the structure of recreational territories by urban planning methods. The main conceptual approaches are identified. It has been established that pre-project activities for the development of adaptive, a kind of statement (hypothesis), involving the interconnected solution of urban planning problems, identifying potential key objects, building targeted walking routes, as well as determining the tourist function, the geographical boundaries of the object, etc., such structuring can significantly improve the level and quality of life of the population of the city.

Keywords: architectural principles; public spaces; urban planning; city; urban optimization; square; recreation; urban design.

For citation: Shutka A.V., Gureva E.I. Gradostroitel'naya optimizatsiya struktury rekreatsionnykh territorii na primere skvera na ul. Deputatskoi g. Voronezha [Urban optimization of recreation areas in Voronezh park at Deputatskaya street]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 31–43.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-31-43

Введение

Градостроительная оптимизация рекреационных территорий – тема очень актуальная для г. Воронежа. Территории, предназначенные для отдыха горожан, застраиваются, не благоустроены, просто запущены. В связи с этим проблемы озеленения городов приобретают большую значимость при создании комфортной среды и оптимизации природоохранных (экологических) условий проживания населения (Терешкин А.В., 2016; Сокольская О.Б., 2016; Кругляк В.В., Гурьева Е.И., 2017; Теодоронский В.С., 2019 и др.)¹.

Многие рекреационные территории г. Воронежа требуют внимательно-го изучения и возможной доработки с точки зрения более интересного и отвечающего потребностям населения функционального наполнения, улучшения планировочной структуры, ландшафтного благоустройства зеленых насаждений. Территория сквера по ул. Депутаткой (рис. 1) в Советском городском округе г. Воронежа площадью 25 030 кв. м, одна из интересных, особо охраняемых, со своей историей, показалась интересной для исследования. Относительно недавно, в 2011 г., в сквере по ул. Депутатской была произведена посадка саженцев разных пород деревьев. Работы по благоустройству сквера были выполнены в рамках подготовки к 425-летию основания г. Воронежа. Это живая развивающаяся территория со своей интересной историей [2–4].

¹ Терешкин А.В. Анализ видового состава дендрофлоры озелененных территорий общего пользования центральной части г. Саратова // Наука. Мысль. 2016. Т. 6. № 7-1. С. 111–116.

Сокольская О.Б. Анализ современного ландшафтно-экологического и планировочного состояния исторического бульвара в городской среде // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 111–115.

Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Модели архитектоники рекреационных насаждений для адаптивных систем озеленения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 3. С. 108–112.

Теодоронский В.С. О развитии озелененных пространств г. Смоленск // Вестник ландшафтной архитектуры. 2019. № 17. С. 58–65.

Сквер образован в конце 1930 – начале 1940-х гг. для рабочих механического завода. Жилые здания были запроектированы архитектором Н.Я. Неведровым. Архитектуру зданий дополнили башенки и лепные панно. На правом барельефе изображена первая в СССР высадка десанта, которая состоялась в Воронеже 2 августа 1930 г. [5, 6]. Левый барельеф был призван проиллюстрировать один из главных лозунгов советской эпохи: «Спасибо товарищу Сталину за наше счастливое детство!» После развенчания культа личности Сталина в конце 1950-х гг. на барельефе остались только дети. Так образовалась городская достопримечательность «Летающая девочка».

Зеленые насаждения в сквере поддерживал работник завода Корнюшкин. Он сажал яблони для горожан и призывал местных жителей последовать его примеру. Эта территория также осталась в памяти жителей как Корнюшкин сад [7–10].

В центре ул. Депутатской расположена круглая площадь с кольцевым движением (рис. 2).



Рис. 1. Расположение сквера в структуре района



Рис. 2. Существующая планировочная структура

Современное состояние сквера отличается ряд недостатков: отсутствует функциональное разнообразие; нет единого образа; не организованы входные группы на территорию сквера; детские площадки не имеют специального покрытия; по центральной оси располагается автомобильный проезд; стихийные парковки автомобилей; отсутствуют специальные защитные насаждения вдоль дорог с интенсивным движением транспорта; нет системы навигации; устаревшее оборудование и городская мебель.

Оптимизация процессов градостроительного проектирования территорий общего пользования и создания адаптивных систем озеленения, а также архитектурно-ландшафтная реконструкция существующей планировочной системы требуют выявления архитектурных принципов оптимизации структуры рекреационных территорий методами градостроительного проектирования для создания комфортных условий для жизни граждан.

Цель исследования: оценка состояния насаждений сквера на ул. Депутатской в процессе градостроительной оптимизации и исследование планировочной структуры рекреационной территории для обоснования адаптивных систем озеленения.

В соответствии с поставленной проблемой исследования и обозначенной целью сформированы следующие задачи:

1. Определить специфику планировочной структуры и состояния насаждений рекреационного объекта исследования в процессе архитектурно-ландшафтной реконструкции.

2. Выявить ландшафтно-градостроительные особенности и дать научно обоснованные рекомендации по градостроительной оптимизации рекреационной зоны для обоснования адаптивных систем озеленения.

Результаты комплексного экологического обследования сквера

На территории сквера была проведена ландшафтная таксация, которая включала ландшафтное, биологическое, архитектурное исследование. Территория сквера оценивалась по биологическим, санитарно-гигиеническим, защитным, архитектурно-художественным достоинствам. В результате проведенной работы были выявлены участки с определенными природными и санитарными факторами. Функциональное зонирование сквера показало, что различные по площади и функциям (специализации) участки объединяются схожим биоразнообразием древесной, кустарниковой и травянистой растительности (за исключением территории плодового сада), т. к. они размещены в одинаковых лесорастительных и почвенно-грунтовых условиях (табл. 1).

Таблица 1

Природные предпосылки для градостроительной оптимизации территории для сквера «Депутатский» по степени благоприятности

Природные предпосылки	Тип территорий
	Благоприятные
Рельеф	С уклонами до 10 %
Грунты	По почвенно-грунтовым условиям – черноземы разные, красноземы; по механическому составу – легкие и средние суглинки, супеси
Гидрогеологические условия	Глубина относительно поверхности земли от 2 до 1,5 м

В период ландшафтной таксации проводилось определение типа пространственной структуры (ТПС). Выбор ТПС: проектирование, изменение на новый тип ТПС или его сохранение в камеральный период связан с проектным решением (табл. 2).

По шкале санитарно-гигиенической оценки территория сквера «Депутатский» классифицируется как второй класс, для которого характерно: участок в относительно хорошем санитарном состоянии, с несущественно засорённостью и захламленностью, воздух несколько загрязнен, шум периодический или отсутствует.

Таблица 2

Классификация насаждений и характеристика основных показателей типов пространственной структуры на территории исследуемого объекта (по В.А. Агальцовой)

Тип пространственной структуры		Характеристика	Показатели структуры насаждения
Группа	Индекс		
Существующие			
Полуоткрытые	В	Редины или прогалины с редким или средней густоты подростом или подлеском высотой более 1,5, суммарной сомкнутостью полог не больше 0,5	Разнообразные по составу и возрасту редины с полнотой 0,1–0,2 прогалины с неравномерным распределением деревьев по площади просматриваемости до 50 м
Открытый	В	Несомкнувшиеся культуры	
Проектируемые			
Открытый	Д	Поляны чистые	
Открытый	К	Прочие пространства	

Внешний вид насаждений обуславливается не только видовой формой зеленых насаждений, но и категорией устойчивости произрастающих деревьев. Анализ состояния осуществлялся по каждой породе, произрастающей на территории сквера. Состояние дерева определялось по следующим показателям: состояние архитектоники, характерные черты прироста побегов, механическое или бактериологическое повреждение побегов и ствола по длине и другим характерным признакам. Оценка декоративного качества деревьев складывается из нескольких показателей: искривленность ствола, наличие водяных побегов, поросли у корневой шейки, сбежистости. Категория состояния насаждений определялась по средневзвешенным показателям исследуемого дерева². Оценка состояния каждого исследуемого дерева с присваиваемым инвентарным номером определялась по шестибалльной шкале: 1 – без признаков ослабления, 2 – ослабленное, 3 – сильно ослабленное, 4 – усыхающее, 5 – свежий сухостой, 6 – старый сухостой [1]. На основании средневзвешенных показателей было определено состояние насаждений (рис. 3).

Из диаграммы видно, что около 60 % всех насаждений относится к первой категории – без признаков ослабления, 28 % – ко второй – ослабленное состояние.

Наряду с оценкой устойчивости дерева проводится оценка устойчивости обследуемого зеленого насаждения. В основу положены соответствующие показатели: интенсивность роста, количественные и качественные характеристики подлеска, подроста и напочвенного покрова, декоративные и эстетиче-

² Агальцова В.А. Основы лесопаркового хозяйства. Москва: ГОУ ВПО МГУЛ, 2012. 213 с. ISBN 5-8135-0409-5.

ские особенности древесной растительности по шкале устойчивости насаждений (по Моисееву, Яновскому, 1990)³ (рис. 4).

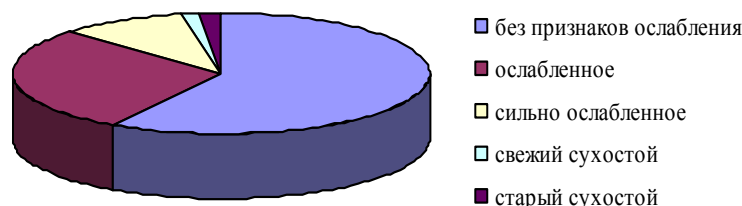


Рис. 3. Распределение состояния насаждений



Рис. 4. Распределение насаждений по оценке устойчивости

Исследования показали, что большая часть насаждений (65 %) относится ко второй категории по шкале устойчивости (рис. 4). Здоровых деревьев в хвойных насаждениях – 71–90 %, в лиственных – 51–70 %.

Концепция проектного предложения по оптимизации и формированию структуры сквера

Концепция отражает основную тематику, идею функционально-планировочной структуры, архитектурно-пространственное наполнение, ландшафтное разнообразие.

Развитие функционально-планировочной структуры предполагает: пешеходную доступность и безопасность; отсечение транспортных потоков; создание зоны для пешеходов; решение подъезда автомобильного транспорта в подземном уровне; многофункциональность использования рекреационного пространства; новые функции встраиваются и дополняют сложившуюся социально-культурную инфраструктуру. Функциональную насыщенность сквера могут обогатить: коммуникативные территории для неформального общения, досуговый центр, кафе, спортивные площадки, библиотека, детские игровые и образовательные пространства, торговые пункты, выставки, зрелищные

³ Моисеев В.С., Яновский Л.Н., Максимов В.А. и др. Строительство и реконструкция лесопарковых зон (на примере Ленинграда). Ленинград: Стройиздат, 1990. 287 с. ISBN 5-274-01045-8.

объекты. Расширение функций делает сквер интересным пространством для всех возрастных групп населения.

Архитектурно-пространственное наполнение сквера включает: объекты обслуживания; городскую мебель; систему освещения; малые архитектурные формы, информационные устройства как навигационную систему. С развитием информационных технологий следует по-новому осмыслить рекреационные территории как инфопространства. Развитие информационных технологий происходит стремительно быстро. Информация и знания создаются и перерабатываются. Рекреационные пространства становятся интерактивными, трансформируемыми, мобильными, адаптивными к новым реалиям жизни.

Разработаны концепции проектного предложения сквера «Депутатский» (рис. 5–10).

Разработка и формирование концепций местности сквера начинается с формулирования проблематики и идеи проекта в соответствии с законом единства, который предполагает, в свою очередь, организованную систему абсолютно всех частей, всех компонентов планировки в ансамбль, органическое целое. Художественным выражением идейных и эстетических задач в данных концепциях являются композиционная целостность и архитектурно-пространственное единство сквера.



Рис. 5. Концепция «Каменный город». Разработала магистр гр. М41 Э.И. Шеблыкина-Монастырева. Руководитель доц. А.В. Шутка

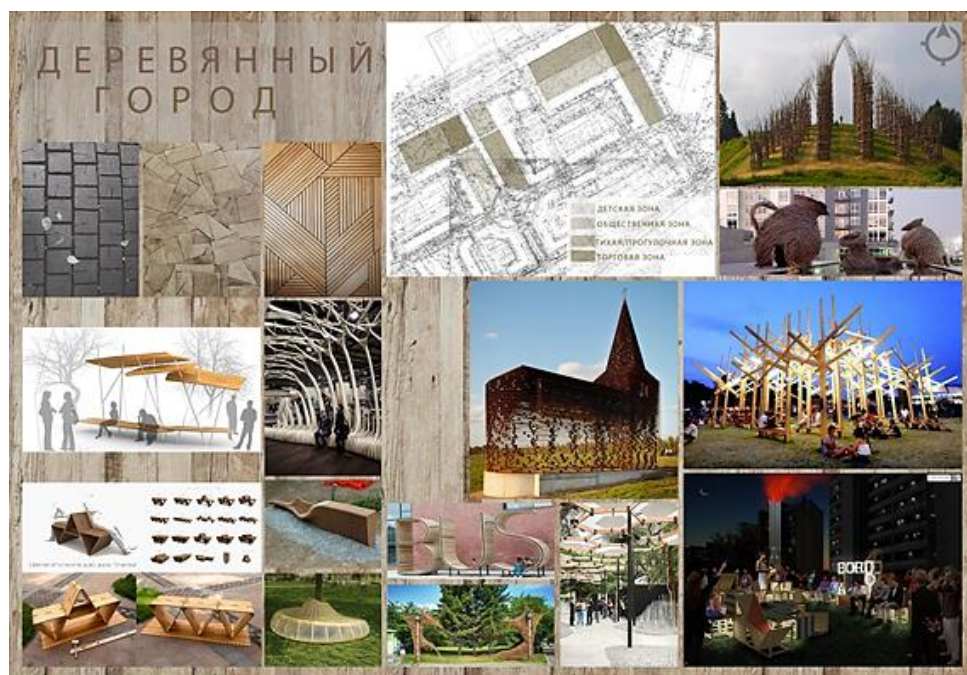


Рис. 6. Концепция «Деревянный город». Разработала магистр гр. М41 Э.И. Шеблыкина-Монастырева. Руководитель доц. А.В. Шутка



Рис. 7. Концепция «Зеленый город». Разработала магистр гр. М41 Э.И. Шеблыкина-Монастырева. Руководитель доц. А.В. Шутка

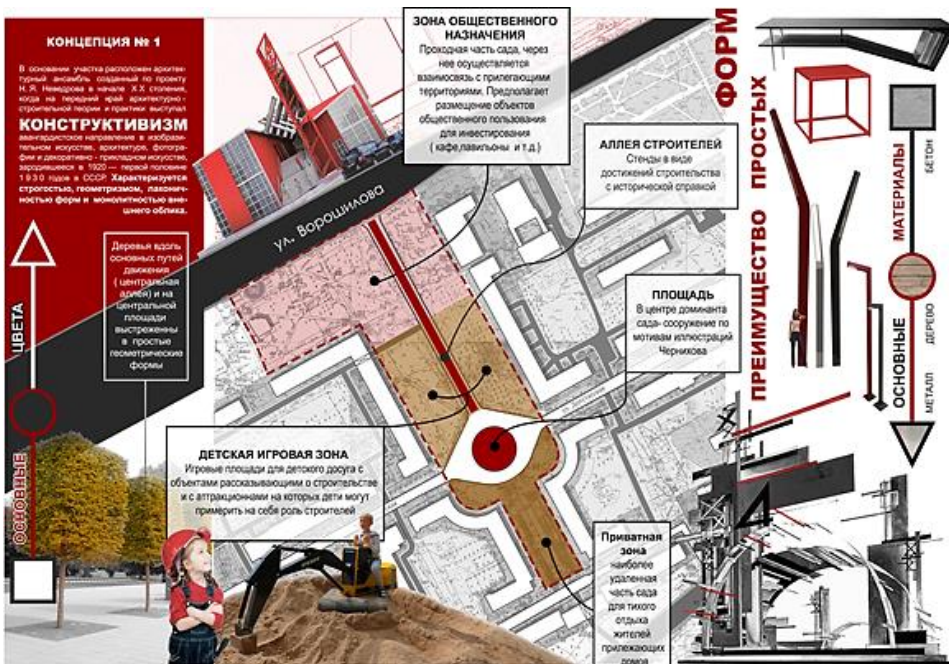


Рис. 8. Концепция «Конструктивизм». Разработала магистр гр. М41 К.В. Зуева. Руководитель доц. А.В. Шутка



Рис. 9. Концепция «Авангард». Разработала магистр гр. М41 К.В. Зуева. Руководитель доц. А.В. Шутка

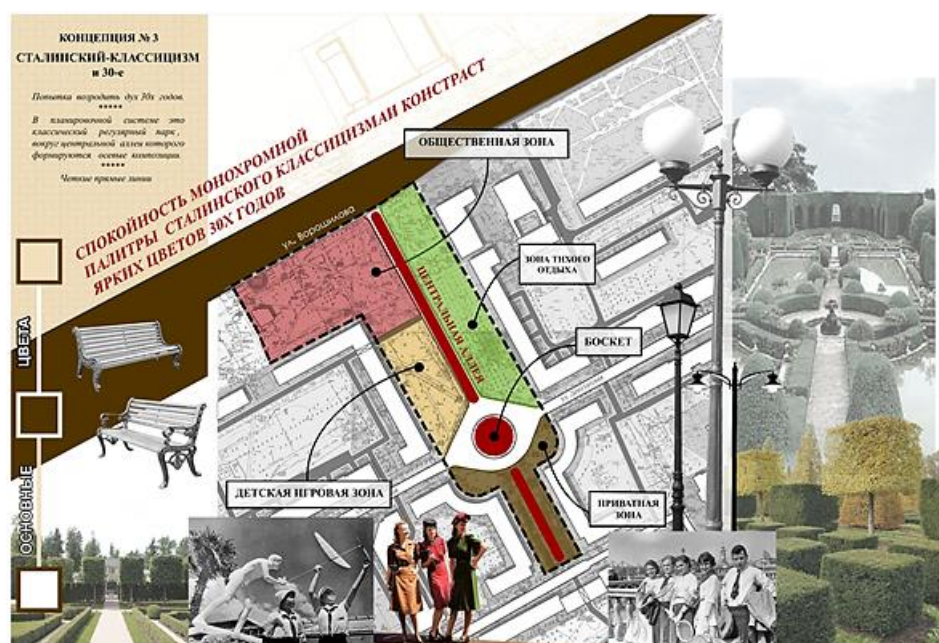


Рис. 10. Концепция «Сталинский классицизм». Разработала магистр гр. М41 К.В. Зуева. Руководитель доц. А.В. Шутка

Ландшафтное разнообразие включает: геопластику; типологию растений; единство архитектуры и природы. Предлагаются варианты газонного покрытия, формирование ландшафтных групп, лугопарк (рис. 11–14).



Рис. 11. Схема газонного покрытия

После проведенного функционального зонирования сквера разнообразные по назначению участки соединяются в нескольких планировочных узлах с единой стилистикой. Композиционным решением выступают доминанты, подчиненные единому дизайнерскому замыслу, мысли, плану.

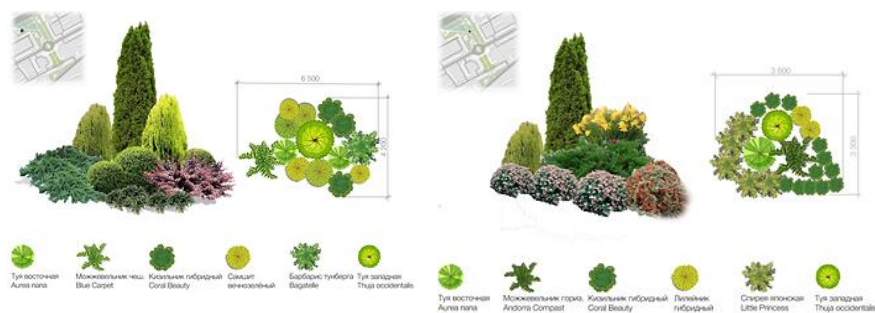


Рис. 12. Ландшафтные группы



Рис. 13. Лугопарк. Подбор растений



Рис. 14. Генплан. Формирование основных функциональных зон. Проектное предложение разработала магистр гр. М41 К.В. Зуева. Руководитель доц. А.В. Шутка

Дорожно-тропиночная сеть с главными свойственными скверу типами садово-парковых насаждений (парковые аллеи) заложена с учетом основного потока рекреативов для последующего целесообразного равномерного распределения посетителей по различным зонам, размещенным в сквере. На направление парковых дорог в большей мере повлияла не только существующая флора, но и предложенное концепцией увеличение биоразнообразия растений; формирование дизайна на основе современных мировых тенденций и направлений (лугопарк).

Заключение

На основе проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Выполненные экспериментально-исследовательские работы по характеристике естественных и антропогенных условий территории объекта по степени благоприятности для градостроительной оптимизации показали, что в целом территории благоприятны для размещения объектов общего пользования, например сквера транзитного типа. Рельеф имеет уклон 10 %, почвенный слой представлен черноземами, красноземами; по механическому составу – легкие и средние суглинки, супеси.

2. В целях повышения комфортности проживания населения следует оптимизировать структуру рекреационных территорий в жилых районах крупнейших городов.

3. Оптимизация рекреационных территорий достигается путем создания единой структуры, включающей: архитектурно-планировочную организацию; многофункциональное использование территории; создание системы зеленых насаждений; увеличение биоразнообразия растений; формирование дизайна на основе современных мировых тенденций и направлений.

4. Формирование концепции проектного предложения должно быть на основе принципа идентичности городской среды, с качествами узнаваемости, своеобразия, характера, оригинальности и отождествления территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агальцова В.А. Основы лесопаркового хозяйства. Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2012. 213 с. ISBN 5-8135-0409-5.
2. Гурьева Е.И. Комплексная оценка систем озеленения рекреационно-оздоровительных объектов // Инженерные системы и сооружения. 2014. № 4-1 (17). С. 78–82.
3. Гурьева Е.И. Современное состояние зеленых насаждений санаториев Воронежской области // Наука. Мысль. 2014. Т. 4. № 1. С. 20–23.
4. Гурьева Е.И., Кругляк В.В. To the issue of renovation of green spaces of sanatorium parks // Наука. Мысль. 2018. Т. 8. № 1. С. 12–28.
5. Гурьева Е.И., Ульянкина В.А. Воздействие человеческой деятельности на ландшафт (на примере г. Липецк) // Архитектурные исследования. 2018. № 3 (15). С. 71–80.
6. Кругляк В.В., Семенютина А.В., Гурьева Е.И. Модели архитектоники рекреационных насаждений для адаптивных систем озеленения // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 3. С. 108–112.
7. Комсомольская правда. URL: <https://www.vrn.kp.ru/daily/26781.5/3815114/>
8. Фролова В.А. Оценка эстетических достоинств природных ландшафтов // Вестник МГУ. 1994. Сер. 5. География. 2. С. 27–33.
9. Vellas F. The International Marketing of Travel and Tourism // A strategic Approach Great Britain: MacMillan Press Ltd., 2014. P. 35–37.

10. Young I. Public-Private Sector Cooperation: Enhancing Tourism Competitiveness // *Annals of Tourism Research*. 2015. V. 29. № 2. P. 21–25.

REFERENCES

1. Agaltsova V.A. *Osnovy lesoparkovogo khozyaistva* [Basics of forest park economy]. Moscow: GOU VPO MGUL, 2012. 213 p. (rus)
2. Gureva E.I. Kompleksnaya otsenka sistem ozeleneniya rekreatsionno-ozdorovitel'nykh ob"ektov [Complex assessment of greening systems of recreational and health facilities]. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya*. 2014. No. 4-1 (17). Pp. 78–82. (rus)
3. Gureva E.I. Sovremennoe sostoyanie zelenykh nasazhdenii sanatoriev Voronezhskoi oblasti [Current state of green plantations of sanatoriums of the Voronezh region]. *Nauka. Mysl'*. 2014. V. 4. No. 1. Pp. 20–23. (rus)
4. Gureva E.I., Kruglyak V.V. The issue of renovation of green spaces of sanatorium parks. *Nauka. Mysl'*. 2018. V. 8. No. 1. Pp. 12–28. (rus)
5. Gureva E.I., Ulyankina V.A. Vozdeistvie chelovecheskoi deyatel'nosti na landshaft (na primere g. Lipetsk) [Impact of human activity on the landscape (on the example of Lipetsk)]. *Arkhitekturnye issledovaniya*. 2018. No. 3 (15). Pp. 71–80. (rus)
6. Kruglyak V.V., Semenyutina A.V., Guryeva E.I. Modeli arkhitektoniki rekreatsionnykh nasazhdenii dlya adaptivnykh sistem ozeleneniya [Models of architectonics of recreational plantings for adaptive systems of gardening]. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2017. No. 3. Pp. 108–112. (rus)
7. "Komsomolskaya Pravda". Available: www.vrn.kp.ru/daily/26781.5/3815114/
8. Frolova V.A. Otsenka esteticheskikh dostoinstv prirodnnykh landshaftov [Assessment of aesthetic qualities of natural landscape]. *Vestnik MGU. Ser. 5. Geografiya* 2. 1994. Pp. 27–33. (rus)
9. Vellas F. The international marketing of travel and tourism, a strategic approach. Great Britain: MacMillan Press Ltd., 2014. Pp. 35–37.
10. Young I. Public-private sector cooperation. *Enhancing tourism competitiveness, annals of tourism research*. 2015. V. 29. No. 2. Pp. 21–25.

Сведения об авторах

Шутка Анна Викторовна, канд. архитектуры, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, 20-е Октября, 84, shutka.a@yandex.ru

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

Authors Details

Anna V. Shutka, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, shutka.a@yandex.ru

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

УДК 72.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-44-52

*А.Г. ТОКАРЕВ,**Национальный исследовательский**Московский государственный строительный университет***ОСОБЕННОСТИ****АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ
ЖИЛОГО КВАРТАЛА РАБОЧЕГО КООПЕРАТИВА
«ТРАМВАЙЩИК» В РОСТОВЕ-НА-ДОНУ**

Статья посвящена одному из первых выстроенных после Гражданской войны кварталов в Ростове-на-Дону – жилому кварталу рабочего жилищно-строительного кооперативного товарищества «Трамвайщик». Отмечено, что в ростовской практике 1920-х гг. изменения происходили постепенно. Практически для всех проектов середины 1920-х гг. характерна традиционная зависимость от структуры города – регулярная застройка кварталов зданиями по периметру вдоль красной линии с традиционной дифференциацией городских пространств на парадное и утилитарное. Показано, что планировочные решения квартала трамвайщиков сочетали в себе как традиционные принципы периметральной застройки, так и принципы популярной в те годы концепции города-сада с резким разуплотнением и озеленением территории. Планировочное и пластическое решение жилых домов находилось под влиянием модерна и неоклассики. Делается вывод, что традиция места строительства и сложившиеся стереотипы пространственного и образного мышления выступили здесь в качестве существенных формообразующих факторов, а сам квартал явился воплощением синтеза старого и нового в архитектурно-градостроительной деятельности переходного периода середины 1920-х гг.

Ключевые слова: советская архитектура 1920-х гг.; конструктивизм; город-сад; преемственность; новации.

Для цитирования: Токарев А.Г. Особенности архитектурно-градостроительного решения жилого квартала рабочего кооператива «Трамвайщик» в Ростове-на-Дону // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 44–52.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-44-52

*A.G. TOKAREV,**The National Research Moscow State University of Civil Engineering***ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING
OF RESIDENTIAL SETTLEMENT OF COOPERATIVE
SOCIETY “TRAMVAYSHCHIK” IN ROSTOV-ON-DON**

The article describes the planning structure and architecture of one of the first residential settlements built after the Civil War in Rostov-on-Don, the cooperative society “Tramvayshchik”. Step-by-step changes in Rostov occurred in the 1920s. Almost each architectural project of the mid-1920s is characterized by the traditional dependence on spatial planning, a regular development of residential settlements with buildings around the perimeter, with conventional differentiation of urban spaces into utilitarian and festive. It is demonstrated that planning solutions of the residential settlements are a combination of both traditional and popular principles of ribbon development with drastic urban decompaction and site landscaping. Planning of residential buildings is strongly influenced by Art Nouveau and Neo-classical architecture. It is

concluded that the construction site and the existing patterns of spatial and visual thinking are a sort of significant formative factors here; the residential settlements are a synthesis of the old and new traditions in architectural and urban development during the transition period of the mid-1920s.

Keywords: Soviet architecture of the 1920s; constructivism; city-garden; continuity; innovations.

For citation: Tokarev A.G. Osobennosti arkhitekturno-gradostroitel'nogo resheniya zhilogo kvartala rabochego kooperativa "Tramvaishchik" v Rostove-na-Donu [Architectural and urban planning of residential settlement of cooperative society "Tramvayshchik" in Rostov-on-Don]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 44–52.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-44-52

Начальный этап архитектурно-градостроительной деятельности 1920-х гг. в Ростове-на-Дону освещался в исследованиях предыдущих лет [1–5]. В публикациях этих же исследователей в той или иной степени рассматривался и квартал кооперативного товарищества «Трамвайщик» как первая крупная стройка в Ростове-на-Дону после Октябрьской революции и Гражданской войны. В настоящей работе ставится цель на основе архивных материалов и натурных обследований, проведенных автором, выявить особенности пространственно-планировочного и пластического решения застройки квартала с позиции отношений традиций и новаций, преемственности.

В столичной практике еще на рубеже XIX–XX вв. при строительстве жилых домов-комплексов акционерных и кооперативных обществ отмечаются первые признаки трансформации принципов регулярного градостроительства – отказ от традиционной для XVIII и XIX вв. иерархии, разделения городских пространств периметральной застройкой на парадное (уличное) и утилитарное (внутриквартальное) [6, 7]. Раскрытие внутриквартального пространства во внешнее улицы приводит к равнозначности этих пространств. Однако даже в столичной практике это – лишь тенденция, и регулярная застройка сохраняет явный перевес до конца 1920-х гг. [8, с. 248].

В Ростове-на-Дону в дореволюционный период подобные тенденции практически не получили воплощения. И только в советский период «с отменой частной собственности на землю, с развитием государственного строительства и созданием крупных строительных кооперативов идеи комплексного жилищного строительства реализуются. Вместе с этим начинают происходить значительные изменения в пространственно-планировочной структуре жилого квартала и отдельного здания» [9]. Но происходят эти изменения постепенно.

В середине 1920-х гг. в период возобновления строительной деятельности в Ростове сохраняются все основные принципы пространственной организации жилого квартала, свойственные XVIII – началу XX в. Это характерно как для кварталов в историческом центре, так и на окраинах города во вновь образованных поселках.

Первыми значительными постройками в 1920-е гг. в Ростове явились 2-, 3-этажные жилые дома рабочего жилищно-строительного кооперативного товарищества «Трамвайщик» в историческом центре города, в образовавшемся

квартале между переулками Крепостным и Нахичеванским, улицами Пушкинской и Новой, прилегающей к Психоневрологической клинике (рис. 1) [10, 11].

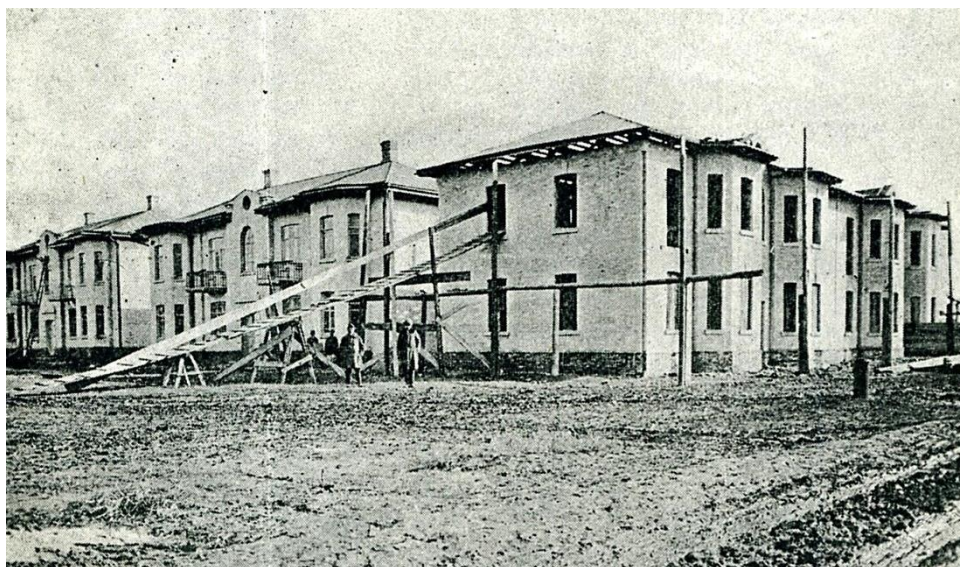


Рис. 1. Строительство квартала кооператива «Трамвайщик». 1925 г. (Жилищное строительство. 1925. № 19, 20)

Автором проекта (1925 г.) является известный ростовский архитектор Леонид Федорович Эберг, окончивший в 1911 г. Московское училище живописи, ваяния и зодчества. В первых послереволюционных работах Эберга, как и во многих других постройках ростовских архитекторов, получивших образование до революции, заметно влияние неоклассической школы.

Строительство в квартале велось последовательно от Пушкинской улицы к Психоневрологической клинике с 1925 по 1928 г. В первоначальном варианте квартал задумывался как комплекс, состоящий из восемнадцати 2-этажных типовых домов, поставленных по периметру участка. В дальнейшем (1926 г.) число зданий по проекту сократилось до четырнадцати за счет соединения застройки в центральной части по улицам Пушкинской и Новой. Кроме того, эта часть застройки была увеличена до трех этажей (сформировав два 3-этажных 18-квартирных корпуса). Это внесло композиционное разнообразие в проект. Однако в процессе строительства застройка по новой улице получила иное решение, образовав единый 3-этажный 48-квартирный корпус длиной во весь квартал. В итоге застройка сократилась до десяти корпусов. Выстроенный уже в 1927–1928 гг. корпус по Новой улице (проект 1927 г.) в планировке и внешнем оформлении решен более рационально в отличие от остальной застройки, строительство которой велось в основном по проекту 1925 г. Кроме того, застройка здесь решена с некоторым отступом от улицы вглубь квартала. Сделано это было после неоднократных обращений руководства Психоневрологической клиники в целях большей изоляции последней от жилых зданий.

Новшество проекта заключалось в значительном разуплотнении застройки, решенной комплексно, с обширной озелененной внутриквартальной территорией. Проект несет в себе отпечаток популярной в 1920-е гг. идеи города-сада. Не случайно в документах по строительству квартал кооператива «Трамвайщик» упоминается как «Квартал-сад» (рис. 2).

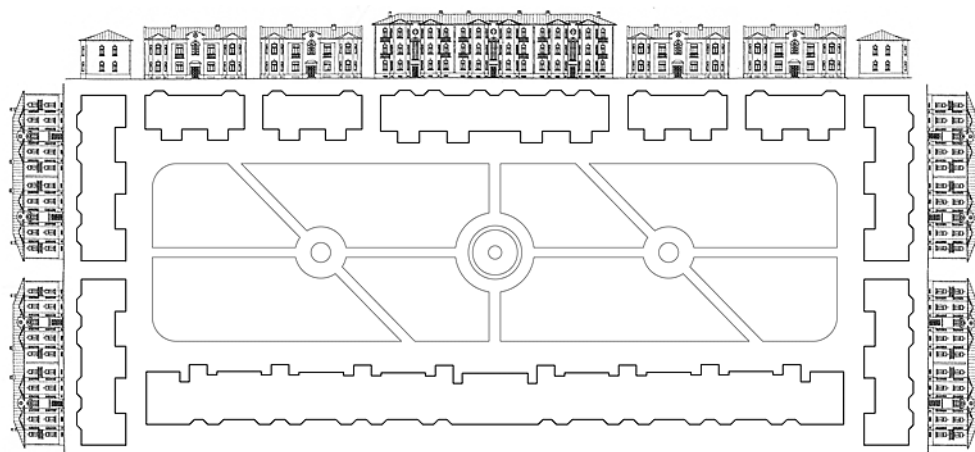


Рис. 2. Генеральный план квартала кооператива «Трамвайщик» (чертеж автора по материалам ГАРО. Ф. Р-175. Оп. 1. Д. 126, 127)

Традиционными остаются пространственно-планировочная структура квартала и система композиционных приемов его организации. Периметральной застройкой формируется традиционная дифференциация городского пространства на внешнее – парадное пространство улиц и внутриквартальное – утилитарное как на уровне отдельного здания, так и на уровне квартала в целом. На уровне здания отмечается дифференциация в планировке и решении фасадов. Квартиры жилых домов имеют компактную, рациональную планировку, характеризующуюся тем, что в сторону улицы ориентированы только жилые комнаты. Подсобные помещения (кухни, ванные, кладовые) ориентированы во двор. Функциональному назначению соответствуют площади помещений и размеры оконных проемов. Соответственно, парадное оформление получают фасады, ориентированные во внешнее пространство улицы. Активная пластика уличных фасадов, осевая симметрия, подчеркнутая оформлением лестничных клеток, контрастируют с рациональным решением фасадов, ориентированных во двор, и глухими торцами боковых фасадов зданий.

Принцип пространственной организации отдельного здания повторяет организацию квартала в целом. Наиболее парадное решение получила застройка по Пушкинской улице, несмотря на северную ориентацию жилых помещений. Сказывается традиционный приоритет парадного городского пространства. Со стороны Пушкинской улицы застройка представляет собой ряд отдельно, но близко поставленных друг к другу объемов, сомкнутых в центральной части с увеличением этажности с двух до трех этажей. В результате формируется не только центр композиции (как главное в отношении к второ-

степенному), но и выявляется ось симметрии всего комплекса. Протяженная застройка (до 180 м) собирается в одно целое, квартал решается как ансамбль. Согласно пространственной иерархии, более сдержанное решение получила 2-этажная застройка по Нахичеванскому и Крепостному переулкам (рис. 2, 3).



Рис. 3. Фасад 8-квартирного жилого дома (чертеж автора по материалам ГАРО. Ф. Р-175. Оп. 1. Д. 126, 127)

В квартале кооператива «Трамвайщик» в полной мере реализован традиционный для регулярного градостроительства XVIII – первой половины XIX в. проектный метод. Построение частного напрямую зависит от структуры общего, от места и роли объекта в структуре города, ансамбля.

Наряду с классицистическими композиционными средствами (осевая симметрия, фронтальность), порожденная внутренней планировочной структурой зданий скульптурность форм сродни объемным построениям модерна. Рациональность пространственно-планировочной структуры здания модерна выражалась в соответствии функционального назначения помещений их площади и в отражении этого во внешнем объеме. Построение объемов ведется «изнутри» – от внутренней организации к внешней форме, что и приводит к скульптурности объемов [12]. Характерным примером из творчества самого Эберга может служить доходный дом М.М. Крещановской на Б. Садовой (1914 г.). Эта же особенность явно прочитывается и в квартале кооператива «Трамвайщик» (рис. 4).

Эберг не только не отказался от использования традиционных средств выразительности, но применил целый арсенал наработанных приемов для формирования образа сооружения. Появляются многочисленные эркеры, придающие скульптурность объемам, карнизы большого выноса, циркульные и полуциркульные окна – излюбленные элементы в творчестве Эберга, присутствующие в большинстве его работ до- и послереволюционного периода (рис. 5, 6).

Композиционная связка полуциркульного и циркульного оконных проемов использовалась Эбергом, в частности, в доходном доме А.М. Штрёма (1910-е гг.). Формальный прием, использованный в системе оконных проемов лестничной клетки рационально решенного дворового фасада, становится востребованным в оформлении парадных уличных фасадов квартала кооператива «Трамвайщик».

Отдельно стоящие объемы с привнесенными из прошлого формами вызывают устойчивые ассоциации с особняками начала века. Особняк как усто-

яввшийся в сознании признак места (Пушкинская являлась престижной улицей-бульваром, застраиваемой доходными домами и особняками) приобретает здесь символическое значение, выступает ведущей темой замысла. Комплексом домов-особняков формируется увеличенная модель особняка в размере целого квартала. Отдельные приусадебные участки объединяются здесь в общем дворовом пространстве-саде. Объединение индивидуального в общее выступает ведущей темой замысла.

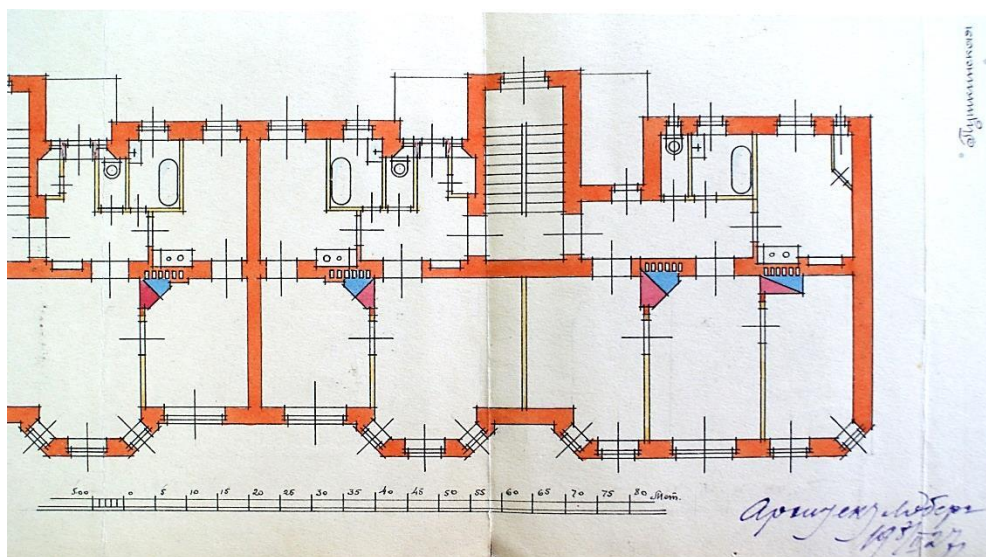


Рис. 4. Фрагмент плана 48-квартирного жилого дома с подписью Л.Ф. Эберга (ГАРО. Ф. Р-175. Оп. 1. Д. 127)



Рис. 5. Застройка по ул. Пушкинской (фото автора)



Рис. 6. Фрагмент фасада по ул. Пушкинской (фото автора)

Традиция места строительства и сложившиеся стереотипы пространственного и образного мышления проявились здесь в качестве существенных формообразующих факторов.

Таким образом, проведенное исследование позволило сделать следующие основные выводы:

- в ростовской практике 1920-х гг. изменения в архитектуре и градостроительстве происходили постепенно. Практически для всех проектов середины 1920-х гг. характерна традиционная зависимость от регулярной структуры города – застройка кварталов зданиями по периметру вдоль красной линии с традиционной дифференциацией городских пространств на парадное и утилитарное;

- планировочные решения квартала кооператива «Трамвайщик» (1925–1928 гг.) сочетали в себе как традиционные принципы периметральной застройки, так и принципы популярной в те годы концепции города-сада с резким разуплотнением и озеленением территории;

- планировочное и пластическое решение жилых домов находилось под влиянием модерна и неоклассики – стиливых направлений, в которых автор проекта Л.Ф. Эберг работал в 1910-е гг.;

- традиция места строительства и сложившиеся стереотипы пространственного и образного мышления выступили в квартале трамвайщиков в качестве существенных формообразующих факторов, а сам квартал – характерный пример синтеза старого и нового в архитектурно-градостроительной деятельности переходного периода середины 1920-х гг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рейбин Я.А.* Ростов-на-Дону. Москва : Гос. изд-во архитектуры и градостроительства, 1950. 48 с.
2. *Есаулов Г.В.* Архитектурно-градостроительное наследие Юга России: его формирование и культурный потенциал : диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры: 18.00.01. Москва, 2004. 482 с.
3. *Есаулов Г.В.* Архитектура Юга России: от истории к современности (очерки). Москва : Архитектура-С, 2016. 568 с.
4. *Есаулов Г.В., Черницына В.А.* Архитектурная летопись Ростова-на-Дону. Ростов-на-Дону : Малыш, 1999. 288 с.
5. *Токарев А.Г.* Преемственность в архитектуре и градостроительстве Ростова-на-Дону 1920–1930-х гг. : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры: 18.00.01. Москва, 2000. 227 с.
6. *Кириченко Е.И.* О некоторых особенностях эволюции городских многоквартирных домов второй половины XIX – начала XX вв. (От отдельного дома к комплексу) // Архитектурное наследство. 1963. Вып. 15. С. 153–170.
7. *Кириченко Е.И.* Пространственная организация жилых комплексов Москвы и Петербурга в начале XX в. // Архитектурное наследство. 1972. Вып. 19. С. 118–136.
8. *Кириченко Е.И.* Русская архитектура 1830–1910-х годов. Москва : Искусство, 1978. 399 с.
9. *Токарев А.Г.* Градостроительное развитие Ростова-на-Дону в XIX – начале XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 3 (32). С. 41–49.
10. *ГАРО.* Ф. Р-175. Оп. 1. Д. 126.
11. *ГАРО.* Ф. Р-175. Оп. 1. Д. 127.
12. *Кириченко Е.И.* О принципах организации пространственной среды интерьеров особняков Ф.О. Шехтеля (рубеж XIX–XX вв.) // Архитектурное наследство. 1986. Вып. 34. С. 246–254.

REFERENCES

1. *Rebain Ya.A.* Rostov-na-Donu [Rostov-on-Don]. Moscow: Stroiizdat, 1950. 48 p. (rus)
2. *Esaulov G.V.* Arkhitekturno-gradostroitel'noe nasledie Yuga Rossii: ego formirovanie i kul'turnyi potentsial: dis. ... dokt. arkhitektury [Architectural and town-planning legacy of the South of Russia: development and cultural potential. DSc Thesis]. Moscow, 2004. 482 p. (rus)
3. *Esaulov G.V.* Arkhitektura Yuga Rossii: ot istorii k sovremennosti (oчерki). [Architecture of the South of Russia: from history to contemporaneity (essays)]. Moscow: Arkhitektura-S, 2016. 568 p. (rus)
4. *Esaulov G.V., Chernitsyna V.A.* Arkhitekturnaya letopis' Rostova-na-Donu [Architectural chronicles of Rostov-on-Don]. Rostov-na-Donu [Rostov-on-Don]. Rostov-on-Don: Malyshev, 1999. 288 p. (rus)
5. *Tokarev A.G.* Preemstvennost' v arkhitekture i gradostroitel'stve Rostova-na-Donu 1920–1930-kh gg.: dis. ... kand. arkhitektury [Legacy and traditions in architecture and urban development of Rostov-on-Don in the 1920–30s. PhD Thesis]. Moscow, 2000. 227 p. (rus)
6. *Kirichenko E.I.* O nekotorykh osobennostyakh evolyutsii gorodskikh mnogokvartirnykh domov vtoroi poloviny XIX – nachala XX vv. (Ot otdel'nogo doma k kompleksu) [Evolution of urban apartment buildings in late in the 19th and early 20th centuries]. *Arkhitekturnoe nasledstvo*. 1963. No. 15. Pp. 153–170. (rus)
7. *Kirichenko E.I.* Prostranstvennaya organizatsiya zhilykh kompleksov Moskvy i Peterburga v nachale XX v. [Spatial planning of residential areas in Moscow and St-Petersburg in the early 20th century]. *Arkhitekturnoe nasledstvo*. 1963. No. 15. Pp. 153–170. (rus)
8. *Kirichenko E.I.* Russkaya arkhitektura 1830–1910-kh godov [Russian architecture in the 1830–1910]. Moscow: Iskustvo 1978. 399 p. (rus)
9. *Tokarev A.G.* Gradostroitel'noe razvitie Rostova-na-Donu v XIX – nachale KhKh v [Urban development of Rostov-on-Don in the 19th – early 20th centuries]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011. No. 3 (32). Pp. 41–49. (rus)

10. GARO [State archives of Rostov region]. Form R-175. List 1. Proc. 126.
11. GARO [State archives of Rostov region]. Form R-175. List 1. Proc. 127.
12. *Kirichenko E.I.* O printsipakh organizatsii prostranstvennoy sredy inter'erov osobnyakov F.O. Shekhtelya (rubezh XIX–XX vv.) [Principles of spatial environment organization in interiors of mansions by F.O. Shekhtel (at the turn of the 20th century)]. *ArkhitECTurnoe nasledstvo*. 1986. No. 34. P. 246–254. (rus)

Сведения об авторе

Токарев Артур Георгиевич, канд. архитектуры, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, tokarev69@inbox.ru

Author Details

Artur G. Tokarev, PhD, A/Professor, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, tokarev69@inbox.ru

УДК 7.71.712.7

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-53-62

*О.О. СМОЛИНА,
Новосибирский государственный
архитектурно-строительного университет*

АРБОРСКУЛЬПТУРА В ВИЗУАЛЬНО-КОММУНИКАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ГОРОДА

Сегодня наиболее распространенными проблемами городов являются: деградация системы зеленых насаждений, низкий уровень благоустройства среды и ландшафтной организации территории, а также недостаточное количество визуально-коммуникационных элементов, способствующих созданию информационно насыщенной городской среды. Для снижения негативных факторов антропогенной среды города возможно применение приема интеграции архитектурного объекта – арборскульптуры – в архитектурно-планировочную структуру города. Арборскульптура – это устойчивые (адаптивные) к гуманной коррекции роста древесно-кустарниковых пород, в структуре стволов и ветвей которых прослеживаются архитектурно-художественные формы. В зависимости от способа компоновки форм, их можно отнести к элементам открытых и закрытых пространств различного функционального назначения. В статье рассматривается возможность использования объектов арборскульптуры в качестве визуально-коммуникационных элементов города, к примеру: уличных рекламных и информационных стендов, стел, вывесок, ориентиров среды и др. Арборскульптуру можно отнести к устоявшейся научной традиции архитектурного сообщества западных стран, однако в России данное направление еще недостаточно развито.

Цель исследования: выявить существующие и проектные объекты арборскульптуры, представленные в формате визуально-коммуникационных элементов города для их изучения, обоснования целесообразности использования и применения в городской среде.

Новизна исследования заключается в предложении использования объектов арборскульптуры в качестве визуально-коммуникационных элементов города.

Методы исследования: сравнительный анализ проектных решений объектов арборскульптуры.

Практическое внедрение объектов арборскульптуры в качестве визуально-коммуникационных элементов поспособствует созданию экоустойчивой, эстетичной и информационно-насыщенной среды города.

Данное исследование может быть использовано при выполнении научно-исследовательских работ, посвященных изучению объектов арборскульптуры.

Ключевые слова: ландшафтный дизайн; искусство арборскульптуры; скульптуры из растущих деревьев; визуальные коммуникации.

Для цитирования: Смолина О.О. Арборскульптура в визуально-коммуникационном пространстве города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 53–62.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-53-62

*О.О. SMOLINA,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*

TREE SHAPING IN VISUAL COMMUNICATION OF URBAN ARCHITECTURE

Purpose: The aim of this work is to identify the existing design objects of tree shaping representing visual communication of the city and a feasibility of its use in the urban environ-

ment. **Research findings:** The current problems of cities include degradation of green spaces, low level of environmental improvement and landscape organization and insufficient visual communication elements that contribute to the creation of appropriate urban environment. To reduce the negative factors of the anthropogenic environment, tree shaping is proposed to improve the urban architecture and development. Tree shaping is hardy-shrub species resistant (adaptive) to the humane correction; their trunks and branches represent architectural forms. Depending on the arrangement, tree shaping can be attributed to the elements of open and closed spaces of different functional purposes. This paper discusses tree shaping as visual communication elements of the city, such as street advertising and information boards, advertising towers, banners, environmental guidelines, etc. Tree shaping can be attributed to well-established scientific tradition in western countries, but in Russia it is still underdeveloped. **Approach:** Comparative analysis of tree shaping design solutions. **Practical implications:** Tree shaping as the urban visual communication contributes to the creation of eco-friendly, aesthetical and informative environment of the city. The obtained results can be used in research works devoted to tree shaping. **Originality/value:** This research proposes the use of tree shaping objects as visual communication of the city.

Keywords: landscape design; tree shaping; tree sculptures; visual communications.

For citation: Smolina O.O. Arborskul'ptura v vizual'no-kommunikatsionnom prostranstve goroda [Tree shaping in visual communication of urban architecture]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 53–62. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-53-62

Введение

Актуальность исследования обусловлена деградацией и дестабилизацией системы зеленых насаждений, а также необходимостью создания системы визуально-графических знаков, отвечающих требованиям экологичности и учитывающих композиционно-пространственные решения систем отображаемой информации. Статья продолжает цикл работ автора, посвященных изучению возможности интегрирования бионических малых архитектурных форм в городской ландшафт [1, 2].

«Непрестанно растущие пространства обитания человека, скорость передвижения и перемещения из одного пункта в другой способствуют развитию информационно-коммуникативного поля, с которым без специальных средств ориентирования, информирования или адаптации человек зачастую справиться не в состоянии...» [3].

Возникает вопрос: «Как создать среду визуально-графических знаков и решений, отвечающих требованиям эстетичности, эргономичности и узнаваемости в высокоплотной урбанизированной среде города?» Решением может стать применение искусства арборскультуры, аккумулирующего древесные растения и их архитектурно-художественное оформление в элементы городской среды. Так, можно предположить улучшение экологической ситуации в зонах локации объектов арборскультуры (на микроуровне) и одновременно повышение информативности, узнаваемости среды при практическом использовании объектов арборскультуры в качестве визуальных коммуникаций города.

Доказательством целесообразности данного предложения являются следующие утверждения: во-первых, объекты арборскультуры относятся к элементам живой природы, являясь наиболее предпочтительными для включения в общую систему визуально-графических знаков и решений города, т. к. чело-

век всегда стремился к тесной взаимосвязи с природой, а по прошествии последнего десятилетия это стремление стало еще более явным в связи с высокими темпами урбанизации, индустриализации, автомобилизации, ухудшением экологии в целом; во-вторых, арборскульптура – это искусство, поэтому любой объект, «выращенный» из древесно-кустарниковых пород, должен обладать художественным образом, эстетичностью; в-третьих, бионические объекты на сегодняшний день не смогут сразу стать узнаваемыми и идентичными, однако при их включении в городскую среду произойдет процесс их унификации участниками среды, и впоследствии, предположительно, они смогут стать полноценными элементами среды в формате визуальных коммуникаций.

Вопрос эстетичности объектов арборскульптуры в формате визуальных коммуникаций требует более детального рассмотрения. Вариант «выращивания» бионических объектов в специализированном питомнике для растений с последующим их перемещением в место дальнейшей эксплуатации считается наиболее предпочтительным. Если по проекту наиболее целесообразным выбран способ «выращивания» бионических объектов непосредственно в месте их дальнейшей эксплуатации (к примеру, вблизи улиц и дорог, в парковых зонах и др.), то в данном случае необходимо разработать комплекс мероприятий по декорированию объектов арборскульптуры по мере их формирования, т. к. данный процесс может быть весьма продолжительным (от 4 до 10 и более лет). Сроки формирования объектов арборскульптуры зависят от типологии объектов, их габаритов, функционального назначения и др.

Цель исследования: выявить существующие и проектные объекты арборскульптуры, представленные в формате визуально-коммуникационных элементов города, для их изучения, обоснования целесообразности использования и применения в городской среде.

Задачи исследования: во-первых, определить арборскульпторов, бионические объекты которых можно использовать в качестве визуально-коммуникационных элементов города; во-вторых, сформировать принципы размещения данных типов объектов в городской среде.

Новизна исследования заключается в предложении использования объектов арборскульптуры в качестве визуально-коммуникационных элементов города.

Методы исследования: сравнительный анализ проектных решений объектов арборскульптуры.

Результаты исследования

На основании анализа результатов отечественных и зарубежных научных разработок, проектных решений, исторического развития объектов арборскульптуры [4–9] были выявлены следующие арборскульпторы, бионические работы которых можно использовать в качестве объектов визуально-коммуникационных элементов города:

- российские: *А.И. Ковешников, Н.А. Ширяева, М.А. Ставцев;*
- зарубежные: *Иезекииль Голанских, Аарон Наве, Ричард Римс, Питер Кук и Бекки Нортей, Аксель Эрландсон.*

Рассмотрим более подробно работы этих арборскульпторов.

А.И. Ковешников, Н.А. Ширяева, М.А. Ставцев (г. Орел, Россия). Специалисты кафедры ландшафтной архитектуры Орловского государственного аграрного университета с 2007 г. ведут работы по созданию арборпластических скульптур из деревьев и кустарников, приспособленных к условиям гуманной коррекции роста: ясень обыкновенный, клен ясенелистный и остролистный, черемуха обыкновенная [10].

Иезекииль Голанских и Аарон Наве (Ezekiel Golan and Aharon Naveh, Израиль). Иезекииль Голанских разработал два концептуальных проекта: первый – бионический уличный рекламный стенд (рис. 1, а) и второй – стела (NYC – New York city – город Нью-Йорк) (рис. 2, а). Процесс формирования он предлагает осуществлять на основании запатентованной им технологии – арборскульптурные объекты «выращивают» в контейнерах гидропонной установки, которые имеют отверстия на дне и боковых стенках. Форма и размеры отверстий задают определенную конфигурацию корням произрастающих древесных растений [11].

В рамках научно-исследовательской работы студентов Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета НГАСУ (Сибстрин) были разработаны концептуальные проекты арборскульптуры в формате уличных рекламных и информационных стендов (рис. 1, б) и бионических стел из растущих элементов озеленения (рис. 2, б). В данных работах коллективом кафедры градостроительства и городского хозяйства НГАСУ (Сибстрин) отмечается эргономичный подход дизайнерских решений, базирующийся на принципах бережного формирования из древесных растений объектов арборскульптуры, а также возможность поэтапной реализации проекта.

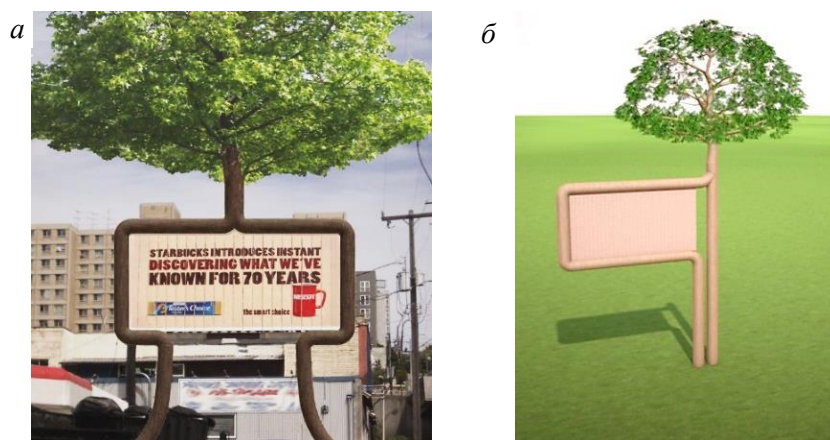


Рис. 1. Концептуальные проекты бионических уличных рекламных и информационных стендов:

а – авторский проект Иезекииля Голанских (URL: <http://treeshapers.net/plantware-by-ezekiel-golan-yale-stav>); б – авторская работа студентов НГАСУ (Сибстрин)

Арборскульптор Аарон Наве работает в направлении биоимплантации с 1985 г. Несколько видов деревьев, «выращенных» им, произрастают и сегодня в пустыне Негев (рис. 5, крайний слева).

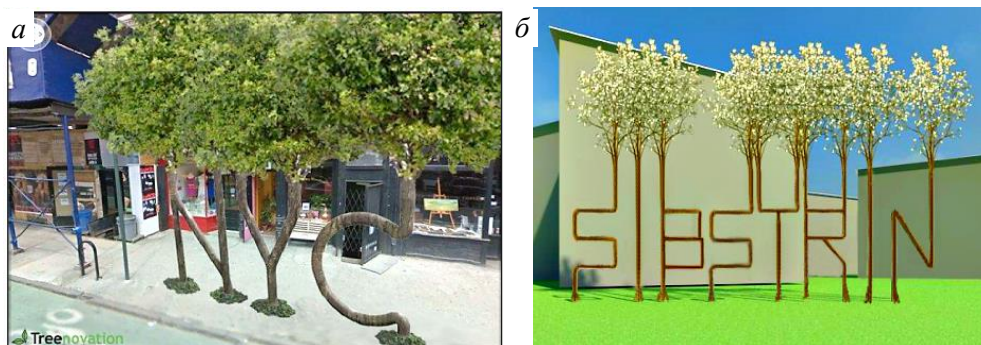


Рис. 2. Концептуальные проекты бионических стел из растущих элементов озеленения:
 а – NYC – New York city – город Нью-Йорк, автор: Иезекииль Голанских (URL: <http://treeshapers.net/plantware-by-ezekiel-golan-yale-stav>); б – Sibstrin – «НГАСУ (Сибстрин)» – Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, авторская работа студентов

Ричард Римс (Richard Reames, США) «вырастил» из быстрорастущего вида тополя бионический арт-объект (Love – любовь) (рис. 3). Данные элементы, интегрированные в городскую среду, будут вызывать у участников среды чувство принадлежности и идентичности места. Ричард Римс дает подробное руководство по «выращиванию» арборскульптурных объектов различных категорий практического использования в своем научном издании «Арборскульптура – решения для маленькой Планеты» [12].



Рис. 3. Бионический арт-объект, «выращенный» из быстрорастущего вида тополя (URL: <http://www.arborsmith.com/arborsculpture/>)

Питер Кук и Бекки Нортей (Peter Cook and Becky Northey, Австралия) специализируются на формировании арборскульптурных объектов в категории практического использования «садово-парковая скульптура», где отличительной чертой их скульптурных композиций является «выращивание» элементов озеленения по форме, напоминающей людей. Свои эксперименты над деревьями они называют «искусством управлять формой растущих деревьев» (Pooktre) [13]. На рис. 4 представлены арборскульптурные объекты в катего-

рии практического использования: «уличные вывески», «выращенные» из алычи (сливы растопыренной) и миробалана серого (филлантус эмблика), продолжительность формирования которых занимала семь лет.



Рис. 4. Бионические уличные вывески из алычи и миробалана серого (URL: <http://pooktre.com/photos/>)

Аксель Эрландсон (Axel Erlandson (1884–1964), США). Его арборскульптурные объекты из платанов (чинар или чинара) («Парк Гилрой» (Park Gilroy) г. Гилрой (Калифорния)) (рис. 5), сформированные изначально в качестве скульптурных объектов, могут применяться в формате визуальных коммуникаций следующих типов: «бионических уличных вывесок» и «информационных и рекламных табло». Данные объекты способствуют созданию безопасной информационно насыщенной городской среды, могут содержать специфическую информацию о направлениях, конечных целях или месте расположения различных объектов городской среды.



Рис. 5. Бионические уличные таблички, вывески, указатели (ориентиры) из платанов (URL: <http://treeshapers.net/aharon-naveh>)

Концептуальный проект ATREE? («Дерево?»), разработанный в 2011 г. дизайнерами компании BOARD из Роттердама (Бюро архитектуры, исследований и дизайна) на Европейском конкурсе архитектуры, дизайна, реализации

эко- и агроматериалов (European Competition of Architecture, Design, Realisations in Eco and Agro-Materials), предложен в качестве оригинальной идеи по созданию временных бионических инсталляций, которые уместно, по мнению архитекторов, было бы устраивать по случаю каких-либо важных событий, в частности на массовых празднованиях или при проведении важных выставок, ярмарок и др. «Живые» скульптуры из ивы могут выступать на различных мероприятиях в качестве декораций (рис. 6) [14].



Рис. 6. Концептуальный проект бионических инсталляций из быстрорастущей ивы (URL: <http://bloglandshafta.com/?p=4829>)

Основные принципы размещения арборскульптурных объектов в формате визуально-коммуникационных элементов города

Рекомендуется размещать арборскульптурные объекты в формате визуально-коммуникационных элементов города в соответствии с движением и концентрацией людей, в местах с хорошей видимостью (по возможности они должны быть освещены в вечернее время), располагать их необходимо таким образом, чтобы данные объекты не мешали обзору участников дорожного движения, их содержание должно быть простым и понятным.

Восприятие объектов арборскульптуры должно быть обосновано художественными средствами композиции: размерами, пропорциями его частей (масштабностью), геометрией (типологией) формы, взаимосвязанностью элементов композиции между собой, цветом, образностью и др. Необходимо вписывать объекты арборскульптуры в городскую среду таким образом, чтобы возникало «ощущение индивидуальной вовлеченности к образному диалогу».

«Наш глаз легко воспринимает объекты, достигающие по высоте 25 м. То, что выше, уже выходит за рамки комфортного восприятия. Для проектирования благоприятной среды жизнедеятельности нужно соблюдать «природный» масштаб, соответствовать критериям канонической красоты» [15].

Бионические объекты визуальных коммуникаций города в эмоциональном, образном плане должны обеспечивать выразительность, информативность городской среды, отличаться лаконичностью, ясностью очертаний. Визуальная коммуникация является инструментом утверждения ценностей, норм и идеалов.

Количество визуальных коммуникаций по пути следования участников среды должно быть оптимальным. Необходимо стремиться к созданию наикратчайших путей следования участников среды при помощи грамотного развития планировочной структуры городов [16], а также комплексного подхода к проектированию визуальных коммуникаций города, являющихся неотъемлемой атрибутикой создания комфортной среды жизнедеятельности.

Заключение

Искусство арборскульптуры – это альтернативный способ бионического благоустройства городской среды (в том смысле, что объекты арборскульптуры выступают не подобием живому организму, а самим живым организмом при благоустройстве), нацеленное на улучшение экологической ситуации в городе, повышение качества озеленения и репрезентативности городских ландшафтов. С учетом перспектив развития данного искусства предлагается включение арборскульптуры в общую систему визуальных коммуникаций города.

Выявлено, что следующие арборскульптуры практикуются в формировании арборскульптурных объектов в категории практического использования: «визуально-коммуникационные элементы города»: А.И. Ковешников, Н.А. Ширяева, М.А. Ставцев (Россия), Иезекииль Голанских и Аарон Наве (Израиль), Ричард Римс (США), Питер Кук и Бекки Нортей (Австралия).

Интеграция объектов арборскульптуры в городскую среду должна осуществляться с учетом эколого-стратегических, ландшафтно-функциональных, визуально-эстетических и экономических аспектов.

Как уместно заметил Нирандр Бонатер (Nirandr Boonnetr, Таиланд): «Более продуктивно и полезно работать с природой, нежели разрушать ее» [17].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смолина О.О. Интегрирование бионических малых архитектурных форм в городской ландшафт // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 6. С. 87–97.
2. Смолина О.О. Арборскульптура как новый формат арт-объектов в садово-парковом искусстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 2. С. 76–88.
3. Михайлова А.С., Сорвачева Н.А. Современный язык визуальных коммуникаций // Дизайн-ревью. 2012. № 1–2. С. 95–104.
4. Мурашко О.О. Исторический анализ тенденций ландшафтного дизайна – арборскульптура // Приволжский научный журнал. 2015. № 3 (35). С. 178–183.
5. Ask J. Tailored Trees // Tree Shaping in a Public Environment. 2012 (15). 23 p. URL: http://stud.epsilon.slu.se/4755/1/ask_j_120903.pdf (Accessed: July 19, 2018).
6. Hartmann H.T., Kester D.E., Geneve R.L., Davies F.T. Hartmann and Kester's Plant Propagation // Principles and Practices. New Jersey, 2001. 7. 928 p.
7. Gale B. The potential of living willow structures in the landscape // Title of dissertation. Master's thesis. State University of New York College of Environmental. Science and Forestry Syracuse, 2011. 54 p.
8. Link T. Arborsculpture: An Emerging Art Form and Solutions to our Environment // Senior project for Bachelor of Science degree in Landscape Architecture. University of California, Davis, 2008. 33 p.
9. Block H.F. Wir pflanzen eine Laube: bauen mit lebenden Geholzen // Staufenberg Freiburg: Auflage, 2008. 101 p.
10. Ковешников А.И. Арборскульптура: новая технология в ландшафтном дизайне (из опыта кафедры ландшафтной архитектуры Орловского государственного аграрного университета) // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 46. С. 125–129.
11. Патент 7328532 US. Method and a kit for shaping a portion of a woody plant into a desired form : опубл.12.02.2008 / Golan E. URL: <http://www.google.com.ar/patents/US7328532> (дата обращения: 05.11.2019).
12. Arborsculpture by Richard Reames. URL: <http://treeshapers.net/arborsculpture-by-richard-reames> (дата обращения: 04.11.2019).

13. Cook P., Northey B. 3 Methods of Tree Shaping every aspiring tree shaper should be aware of – 1stedition. Yangan: SharBrin, 2010. URL: <http://www.pooktre.com/extra/3/methods.html> (дата обращения: 05.11.2019).
14. Проект «Дерево?» – новое слово в современной арборскультуре. URL: <http://bloglandshafta.com/?p=4829> (дата обращения: 05.11.2019).
15. Липовцева С.Р., Каренов Г.Е. Масштабность архитектурной среды города Красноярска // Международный студенческий научный вестник. Пенза, 2018. С. 1023–1025.
16. Бузская О.М. Ценностные ориентиры в стратегиях развития визуальных коммуникаций // Новая наука: современное состояние и пути развития. 2016. № 7-2. С. 143–147.
17. Life Art by Nirandr Boonnetr. URL: <http://treeshapers.net/life-furniturelife-art-by-nirandr-boonnetr> (дата обращения: 05.11.2019).

REFERENCES

1. Smolina O.O. Integrirovanie bionicheskikh mal'kh arkhitekturnykh form v gorodskoi landshaft [Hardscaping integration in townscape]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 6. Pp. 87–97. (rus)
2. Smolina O.O. Arborskul'ptura kak novyi format art-ob"ektov v sadovo-parkovom iskusstve [Arborsculpture as a new format of art objects in landscape gardening]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 2. Pp. 76–88. (rus)
3. Mikhailova A.S., Sorvacheva N.A. Sovremennyy jazyk vizual'nykh kommunikacij [Modern language of visual communications]. *Dizajn-revju*. 2012. No. 1–2. Pp. 95–104. (rus)
4. Murashko O.O. Istoricheskii analiz tendentsii landshaftnogo dizaina – arborskul'ptura [Tree shaping is a historical trend of landscaping]. *Volga scientific journal*. 2015. No. 3 (35). Pp. 178–183. (rus)
5. Ask J. Tailored trees – tree shaping in a public environment, 2012 (15). 23 p. Available: http://stud.epsilon.slu.se/4755/1/ask_j_120903.pdf (accessed July 19, 2018).
6. Hartmann H.T., Kester D.E., Geneve R.L., Davies F.T. Hartmann and Kester's plant propagation: principles and practices. New Jersey, 2001.
7. Gale B. The potential of living willow structures in the landscape. MSc Thesis. State University of New York College of Environmental. Science and Forestry Syracuse. 2011. 54 p.
8. Link T. Arborsculpture: an emerging art form and solutions to our environment. senior project for bachelor of science degree in landscape architecture. University of California, Davis, 2008. 33 p.
9. Block H.F. Wir pflanzen eine Laube: bauen mit lebenden Geholzen. Staufenbei Freiburg: Auflage. 2008. 101 p.
10. Kovesnikov A.I. Arborskul'ptura: novaya tekhnologiya v landshaftnom dizaine (iz opyta kafedry landshaftnoi arkhitektury Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta) [Tree shaping: new landscape technology (experience of the Department of Landscape Architecture of Orel State Agrarian University)]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2016. No. 46. Pp. 125–129. (rus)
11. Golan E. Method and a kit for shaping a portion of a woody plant into a desired form. Pat. US N 7328532. Publ. 12.02.2008. Available: www.google.com.ar/patents/US7328532 (accessed November 5, 2019)
12. Arborsculpture by Richard Reames. Available: <http://treeshapers.net/arborsculpture-by-richard-reames> (accessed November 4, 2019)
13. Cook P., Northey B. 3 methods of tree shaping every aspiring tree shaper should be aware of, 1st ed., Yangan: SharBrin, 2010. Available: www.pooktre.com/extra/3/methods.html (accessed November 5, 2019).
14. Проект «Дерево?» – новое слово в современной арборскультуре [The Project “Tree?” as a new word in modern arborsculpture]. Available: <http://bloglandshafta.com/?p=4829> (accessed November 5, 2019) (rus)
15. Lipovtsev S.R., Karpov G.E. Masshtabnost' arkhitekturnoi sredy goroda Krasnoyarska [Architectural environment of Krasnoyarsk]. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik*. 2018. Pp. 1023–1025. (rus)

16. Buzskiy O.M. Tsennostnye orientiry v strategiyakh razvitiya vizual'nykh kommunikatsii [Value orientations in strategies of visual communication development]. *Novaya nauka: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya*. 2016. No. 7-2. Pp. 143–147. (rus)
17. Life Art by Nirandr Boonnetr. Available: <http://treeshapers.net/life-furniturelife-art-by-nirandr-boonnetr> (accessed November 5, 2019).

Сведения об авторе

Смолина Олеся Олеговна, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительного университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, ZelenoeSt-vo@mail.ru

Author Details

Olesya O. Smolina, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, ZelenoeSt-vo@mail.ru

УДК 728.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-63-74

*Т.Ю. РЕЗНИЧЕНКО,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ ПЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ В ДЕРЕВЯННОЙ ЗАСТРОЙКЕ КОНЦА XIX – НАЧАЛА XX ВЕКА В ГОРОДЕ ТОМСКЕ

В феврале – июне 2019 г. автором статьи было проведено натурное обследование деревянной жилой застройки конца XIX – начала XX в. в г. Томске на территории исторического района Воскресенская гора. Цель обследования – выявление и фиксация инженерно-технического оборудования – печного отопления, ценных в архитектурно-художественном отношении печей, определение их типологии, степени сохранности. В дополнение к натурному обследованию застройки были проведены историко-архивные исследования, что позволило определить принципы первоначального размещения печей в планировочной структуре домов.

Актуальность исследования обусловлена стремительной утратой как исторических деревянных зданий, так и систем печного отопления, важной составляющей для сохранения ценной исторической среды, и необходимостью изучения причин разрушения и утраты исторических зданий. Новизна исследования заключается в собранном и проанализированном материале, включающем натурные и архивные исследования, ранее не опубликованные. В ходе проведенных исследований была изучена и обмерена печь, ценная в архитектурно-художественном отношении, в доме на ул. Октябрьской, 33.

Выводами являются описания основных проблем на примере данного объекта, связанных с сохранением инженерно-технического оборудования – печного отопления и характерных для исторической деревянной застройки в целом.

Ключевые слова: Томск; архитектурное наследие; инженерно-техническое оборудование; печное отопление; охрана культурного наследия.

Для цитирования: Резниченко Т.Ю. Проблемы сохранения печного отопления в деревянной застройке конца XIX – начала XX века в городе Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 63–74.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-63-74

*T.Yu. REZNICHENKO,**Tomsk State University of Architecture and Building*

PRESERVATION OF STOVE HEATING IN A WOODEN HOUSE BUILT IN THE 19–20th CENTURIES IN TOMSK

Purpose: The aim of this work is to identify and collect the data on the engineering equipment routinely used for stove heating, which possesses a unique architectural potential determining its typology and preservation. **Design/methodology/approach:** In addition to a full-scale study, the historical review is given. This study determines the principles the stove arrangement in wooden houses. **Research findings:** A rapid loss of both historical wooden houses and stove heating systems is shown, which are considered to be the key elements for maintaining a valuable historical environment. A need for determining the causes of the destruction and loss of historical houses is shown. **Originality/value:** The research includes the not yet published data on historical houses, in particular, at the address 33, October street,

Tomsk, Russia, built in the 19–20th centuries, which is of high architectural potential. **Practical implications:** The results can be used in preservation of engineering equipment of stove heating in historical wooden houses.

Keywords: Tomsk; architectural heritage; engineering equipment; stove heating; cultural heritage protection.

For citation: Reznichenko T.Yu. Problemy sokhraneniya pechnogo otopeniya v derevyannoi zastroyke kontsa XIX – nachala XX veka v gorode Tomske na primere doma na ul. Oktyabr'skoi, 33 [Preservation of stove heating in a wooden house built in the 19–20th centuries in Tomsk]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 63–74.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-63-74

Инженерно-техническое оборудование представляет собой комплекс систем, без которых невозможно обеспечение комфортного пребывания в жилых и общественных зданиях. В жилых зданиях Томска в конце XIX – начале XX в. они были представлены системами отопления, вентиляции и электроосвещения [9].

Деревянная застройка стремительно исчезает не только за счет ее физического уничтожения, но и за счет нарушения микроклимата и вентиляции зданий, что ведет к постепенному разрушению конструкций. Если изменения архитектурного облика из-за перестроек, пристроек, уничтожения декора сразу бросаются в глаза и последствия этого широко обсуждают, то утрата первоначальных отопительных систем на первый взгляд не представляет угрозы объектам. Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения комплекса причин разрушения исторических зданий с оценкой степени влияния на этот процесс утрат исторических систем отопления.

Со второй половины XX в. проводятся глубокие исследования по архитектуре и градостроительству городов Западной Сибири. К настоящему времени достаточно полно изучены традиционные формы городских построек, а также специфика историко-культурного наследия и теоретических проблем градостроительства, сложившиеся на территории Сибири. Большой вклад в изучение истории архитектуры Томска и особенностей деревянного зодчества внесли историки А.В. Адрианов, Н.Н. Покровский, В.Д. Славнин, Н.М. Дмитриенко, В.П. Бойко, О.В. Богданова, Э.К. Майданюк, А.Н. Жеравина, искусствоведы А.П. Герасимов, Т.Н. Манонина, архитекторы Э.И. Дрейзин, П.Ю. Рачковский, А.М. Прибыткова-Фролова, Н.В. Шагов, В.Г. Залесов, Л.С. Романова, Е.В. Ситникова, И.В. Куликова и др.

Изданные во второй половине XIX в. курсы по отоплению и вентиляции зданий, а также книги по печному делу инженеров (Г.С. Войницкого, П.В. Степанова, С.Б. Лукашевича, В.П. Стаценко, А.А. Веденяпина, В.В. Пересвет-Солтана, П.Ф. Ерченко, И.И. Цыганенко, К.Я. Буслаева и др.) послужили базой для создания в стране норм в области печного отопления. В данной литературе печи рассматриваются с точки зрения конструкций печей, их усовершенствований и теплотехники.

Печи как архитектурно-планировочный элемент в интерьере общественных зданий XVI – середины XIX в., чаще всего дворцов, исследовали

этнографы и историки: И.Е. Забелин, В.И. Даль, М.В. Красовский, М.Г. Рабинович, П.А. Раппопорт, Н.И. Костомаров, А.В. Терещенко, С.М. Соловьев, Н.Г. Устрялов и др.

Изразцовые печи в постройках европейской части России стали объектом исследований Л.А. Беляева, С.А. Маслих, С.И. Барановой, М.Д. Григорьевой, Н.Н. Матвиенко, Н.А. Гангур, А.Г. Курлянчикова, Л.А. Ждановой, И.А. Киселева, А.И. Роденкова, К.В. Лихолат и др. в первую очередь из-за изучения стиливых особенностей изразцового декора.

Изучением типов и конструкций печей в Сибири занимаются немногие ученые. В статье Ю.П. Лыхина и Л.А. Аболиной «Печи и печное отопление в Восточной Сибири в XVIII – середине XIX века» рассмотрены основные типы печей, с помощью которых население отапливало жилые помещения: русская печь, голландская печь, печь-каменка и якутский камелёк (чувал) [7]. А.Ю. Майничева в статье «Печи сибиряков-старожилов Верхнего Приобья: конструктивные особенности и семантика» описывает конструктивные особенности печей, их месторасположение в доме и печи, выявленные при полевых исследованиях, проводившихся в 1997–1998 гг. [8].

В работах, изучающих традиционную усадьбную застройку Западной Сибири, не встречаются исследования, посвященные печам как элементу планировочной структуры жилища. Печное отопление деревянных домов, начиная с момента основания Томска и до начала современной эпохи в истории, остается недостаточно исследованным.

Печи можно классифицировать по различным признакам – по функциональному назначению, наименованию, конструктивному исполнению, тепло-техническим характеристикам и архитектурно-планировочным особенностям [5, 10, 12].

Самой распространенной является классификация, характеризующая печи по месту их появления (голландская, шведская, русская и т. д.) и по имени изобретателя (печь И. Утермарка, каминопечь де Монталамбера, печь конструкции В.Е. Грум-Гржимайло, печь-шведка К.Я. Буслаева и др.). Однако печи, именуемые обывателями «голландка», «шведка» и т. д., в разные периоды имели разную конструкцию и могли называться по-другому в регионах и даже странах [6, 11].

При натурном обследовании невозможно визуально определить конструкцию печи и установить имя изобретателя, но можно установить тип печи по функциональному назначению, которое диктует форму, материал, конструктивное устройство и внешний вид печи.

По функциональному назначению выделяют печи одно-, двух- и многоцелевые. В зависимости от выполняемых функций – отопления помещений, приготовления пищи, кратковременной лучистой отдачи (благодаря открытому огню), нагревания горячей воды, сушки продуктов, одежды, пиломатериалов, выдержки готовой пищи в условиях высоких температур – печи могут быть отопительными, варочными (кухонными), хозяйственно-бытовыми (кормозапарочными, сушильными, хлебопекарными и др.), отопительно-варочными, печами-каминами и т. д. [5, 10, 12].

Обследование деревянной жилой застройки конца XIX – начала XX в., проведенное автором на предмет сохранности печного отопления и выявления

наиболее ценных печей в архитектурно-художественном отношении, было проведено в Томске впервые. Оно выполнялось в феврале – июне 2019 г. на территории исторического района г. Томска Воскресенская гора (рис. 1).

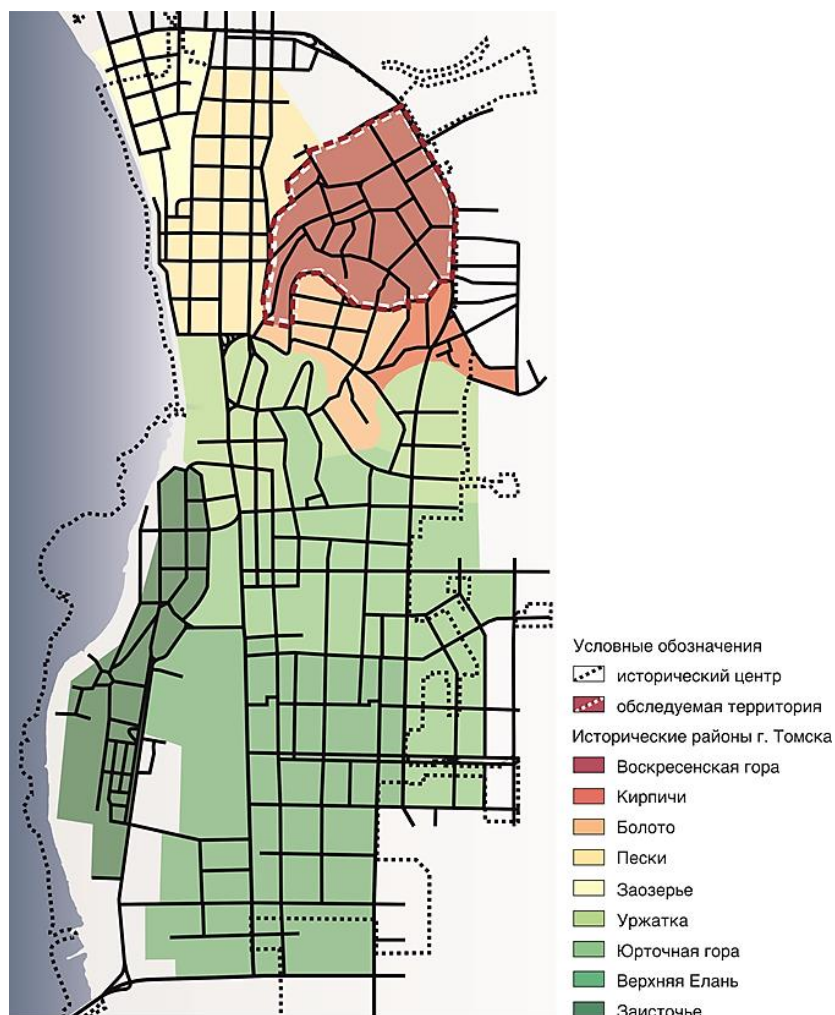


Рис. 1. Схема расположения обследуемой территории в системе исторических районов г. Томска

Исторический район Воскресенская гора – место основания города, получивший название от первой, срубленной в 1622 г., церкви во имя Воскресения Христова. Жилая застройка протянулась от поставленного в 1604 г. острога к Белому озеру уже к 1732–1742 гг., а на рубеже XIX–XX вв. представляла собой в основном деревянные дома [2]. В его границах расположен выявленный объект культурного наследия – достопримечательное место «Воскресенская гора и Белоозерье кон. XIX – нач. XX вв.»¹.

¹ Приказ Департамента по культуре и туризму Томской области № 109/01-09 от 29.03.2013 «О включении в список выявленных объектов культурного наследия зданий и сооружений, расположенных на территории Томской области».

- фотофиксацию объектов исследования – печей, фасадов зданий;
- краткую характеристику объектов, содержащую адрес (современный и исторический), дату постройки, этажность, материал стен, количество квартир, категорию историко-культурного значения объекта культурного наследия, историческую и современную функцию, владельцев;
- оценку технического состояния и степени сохранности обследуемых объектов (на основании визуального осмотра).

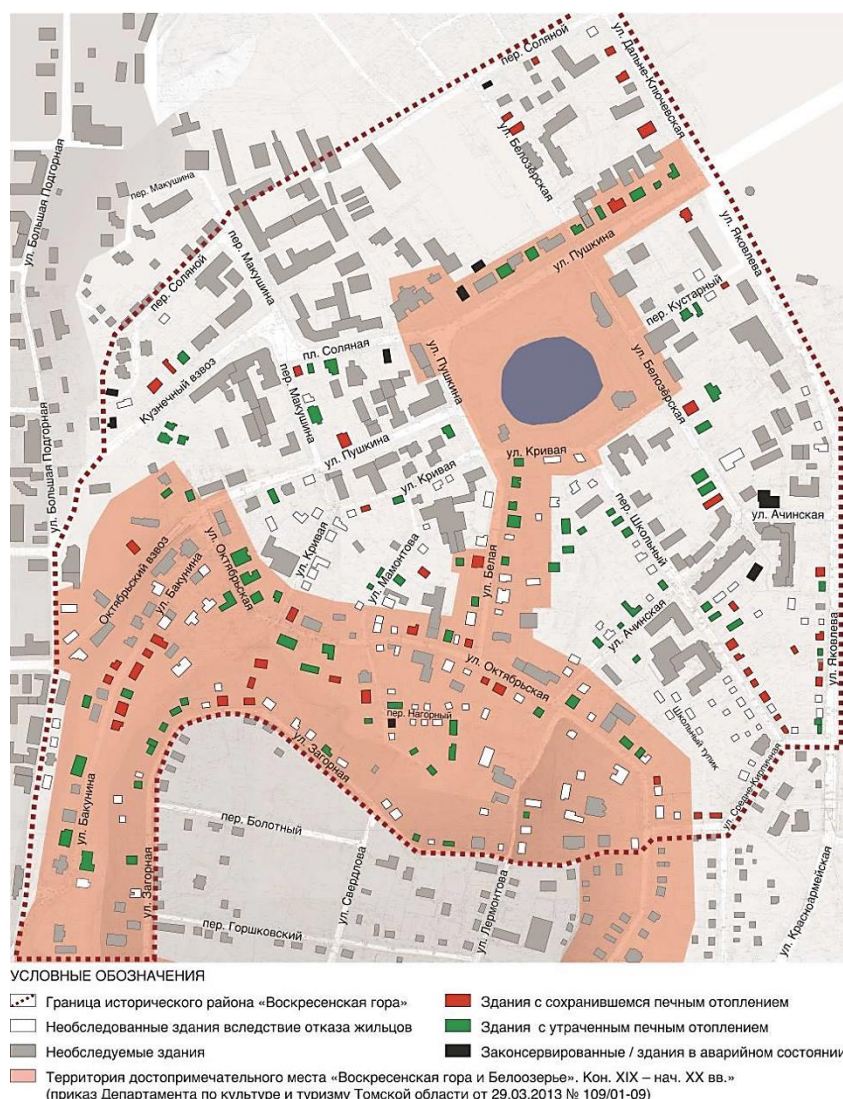


Рис. 2. Схема обследованной деревянной застройки на территории исторического района Воскресенская гора г. Томска

Основная часть обследованных деревянных и смешанных зданий является ценной и рядовой историко-архитектурной средой, 10 объектов включены в Государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации:

1 – объект культурного наследия (ОКН) федерального значения;

9 – ОКН регионального значения;

6 – выявленные объекты культурного наследия.

В ходе проведённого обследования застройки было выявлено, что в 53 домах используется печное, в 90 домах – центральное отопление. По форме в плане встречаемые при обследовании печи прямоугольные, реже – квадратные, зафиксирована 1 многоугольная печь. По функциональному назначению: в большинстве домов – пекарно-отопительные печи, реже – пекарные (перестроены или являются новыми) и отопительные. По основному материалу массива – кирпичные. По материалу облицовки – в большинстве случаев без наружной отделки или оштукатуренные, реже – облицованные (кафелем или изразцами) [4, 10]. Единственная ценная в архитектурно-художественном отношении печь, имеющая практически первоначальный вид, сохранилась в доме на ул. Октябрьской, 33 (рис. 3).



Рис. 3. Объект культурного наследия регионального значения «Дом жилой, кон. XIX в.» по адресу г. Томск, ул. Октябрьская, 33. Северный фасад. Дата съемки декабрь 2019 г.

Здание является объектом культурного наследия регионального значения, включенным в Единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации с наименованием «Дом жилой, кон. XIX в.»² под регистрационным номером 701410150550005³.

² Распоряжение Администрации Томской области № 255-ра от 29.04.2014 «О включении в Единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации выявленных объектов культурного наследия, расположенных на территории города Томска».

³ Приказ Минкультуры России № 942-р от 03.07.2015 «О регистрации объекта культурного наследия регионального значения «Дом жилой, кон. XIX в.» (Томская область).

Месторасположение объекта – в квартале, ограниченном ул. Октябрьской (ранее – Воскресенская), Мамонтова (ранее – Карповская, Мамонтовская), Лермонтова (ранее – Малая Болотная) и пер. Нагорным (ранее – ул. Нагорная) [2].

Дом одноэтажный, прямоугольный в плане, срублен «в лапу». Главный фасад (северный) выходит на ул. Октябрьскую. Цоколь кирпичный, оштукатурен и окрашен. Стены обшиты профильной доской. Архитектурный декор представлен лопатками с накладными элементами и традиционными наличниками, украшенными накладными сквозными и точёными деталями. Карниз, венчающий фасад, декорирован накладной и прорезной деревянной резьбой. В окнах сеней на западном фасаде сохранились цветные витражи.

В ходе архивных изысканий было установлено, что дом построили в 1900 г. [1] и его владельцы часто менялись. В 1908 г. он принадлежал наследникам Кузьмина⁴, в 1915 г. – Селиванову Николаю Лаврентьевичу⁵, в 1933 г. – Горкомхозу (землепользователь – ЖАКТ «Искра» (товарищество № 289) [1]). В настоящее время здесь расположены две квартиры с отдельными входами – с западного и южного фасада.

Первоначально в здании имелось шесть печей (рис. 4). В 2014 г. зафиксировано две изразцовых печи – в помещениях № 3, 7, 8 (рис. 5) и № 1, 4, 5 (рис. 6). В 2019 г. при обследовании дома удалось установить, что печь, располагавшаяся в помещениях № 1, 4, 5, утрачена.

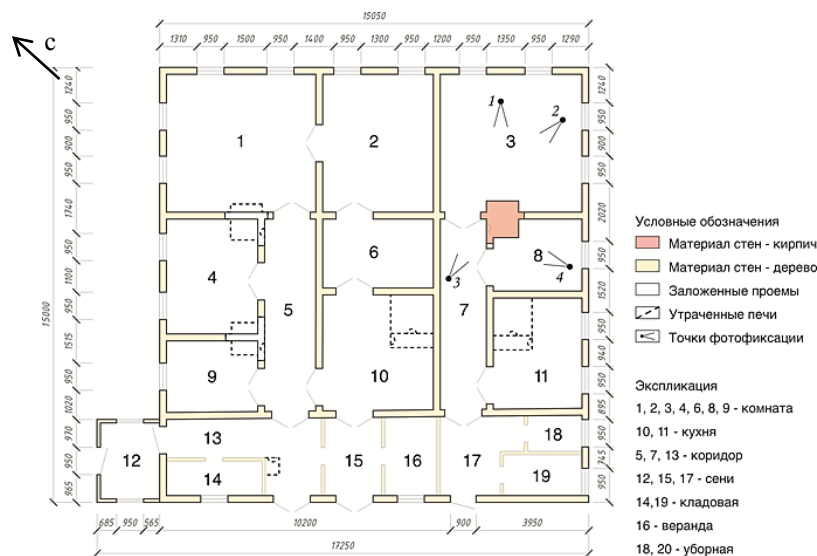


Рис. 4. Объект культурного наследия регионального значения «Дом жилой, кон. XIX в.» по адресу г. Томск, ул. Октябрьская, 33. План этажа дома

⁴ Список улиц г. Томска с поименованием домовладельцев и указанием деления на полицейские, мировые и следственные участки / сост. по распоряжению Том. полицеймейстера 1908 года. Томск: Пар. тип. Н.И. Орловой, 1908. С. 23.

⁵ Список улиц гор. Томска с поименованием домовладельцев и указанием деления на полицейские, мировые и следственные участки / сост. по распоряжению Том. гор. управы 1915 года. Томск: Пар. тип. П.К. Орловой, 1915. С. 61.



Рис. 5. Объект культурного наследия регионального значения «Дом жилой, кон. XIX в.» по адресу г. Томск, ул. Октябрьская, 33. Печь в помещениях № 3 (слева), 7, 8 (справа). Фотографии из архива ОГАУК «Центр по охране и использованию памятников истории и культуры», дата съемки декабрь 2014 г.



Рис. 6. Объект культурного наследия регионального значения «Дом жилой, кон. XIX в.» по адресу г. Томск, ул. Октябрьская, 33. Печь в помещениях № 1, 4, 5. Фотографии из архива ОГАУК «Центр по охране и использованию памятников истории и культуры», дата съемки декабрь 2014 г.

Сохранившаяся печь в смежных помещениях № 3 и 8 находится в рабочем состоянии и используется для отопления, согласно классификации И. Киселева [3], – объемная, среднестенная угловая. Печь изразцовая (изразчатая, израсчатая), сложена из рядовых поливных изразцов размером 320×210 мм, гладких, плоских, без рисунка, расположенных вразбежку. Размеры изразцов по ширине и длине отличаются в среднем на 1,5 см – это результат подгоночной тески [4]. В парадной комнате отделка печи (рис. 7) – рядовыми и рельефными изразцами. Последние лекальные, составляющие ленточный профиль – карниз, цоколь, «каминную» полку. Зеркала печи декорированы контурными рамами (лицевое, главное – сверху и снизу полки, боковые – сверху полки). В центре лицевого зеркала расположена рельефная деталь с изображением букета цветов. Венчающая ярусная часть печи, расположенная над карнизом, богато украшена изразцами с лепниной. Печь перекрашивалась, что зафиксировано на фото 2014 г. (рис. 5). Со стороны смежного помещения печь облицована рядовыми плоскими и угловыми (наугольными) изразцами и украшена профилированным карнизом. Топка осуществляется из коридора, где печь выполнена вровень с плоскостью стены. Стеновое зеркало – изразцовое, частично окрашенное в цвет стены (рис. 8). Учитывая, что в подавляющем большинстве обследованных домов равных по ценности печей не сохранилось, можно сделать заключение об ее уникальности.



Рис. 7. Объект культурного наследия регионального значения «Дом жилой, кон. XIX в.» по адресу г. Томск, ул. Октябрьская, 33. Печь в помещении № 3 (точки фотофиксации 1 и 2). Дата съемки ноябрь 2019 г.



Рис. 8. Объект культурного наследия регионального значения «Дом жилой, кон. XIX в.» по адресу г. Томск, ул. Октябрьская, 33. Печь в помещениях № 7 (слева) и 8 (справа) (точки фотофиксации 3 и 4). Дата съемки ноябрь 2019 г.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что уничтожению печей в исторической застройке способствует:

- подключение домов к сетям центрального отопления;
- желание владельцев квартир увеличить площадь помещений;
- отсутствие должного ухода за печами, текущих ремонтов, своевременной чистки дымовых каналов;
- перестройки и использование печей в иных целях, не по назначению.

Одной из причин утраты печи в помещениях № 1, 4, 5 (рис. 6) является то, что в момент ее сноса здание еще не было включено в перечень объектов культурного наследия. До сих пор не утвержден предмет охраны, и отсутствует охранное обязательство, содержащее требования к сохранению объекта культурного наследия, предотвращению повреждения, разрушения или уничтожения, изменения облика интерьера⁶.

Проблема заключается еще в том, что здания могут не представлять значимости с точки зрения архитектуры, но это не означает, что там во всех случаях будут отсутствовать печи, представляющие утилитарную и архитектурно-художественную ценность.

Однако статус объекта культурного наследия еще не является гарантом сохранения его инженерно-технического оборудования. В случае если печи

⁶ Федеральный закон от 25.06.2002 №73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» (с изменениями на 18 июля 2019 г.).

не будут определены как предмет охраны, от сноса и перестроек они также не застрахованы.

Бесконтрольный, несанкционированный снос печей и печных труб может служить причиной дальнейшей утраты всего деревянного здания, т. к. данное инженерное оборудование непосредственно участвует в вентиляции, необходимой для правильной эксплуатации зданий.

С учетом того, что информация о сохранности печей в исторической застройке Томска незначительна и научных исследований по данной тематике немного, работы по выявлению печей и разработке мер по сохранению наиболее ценных из них не терпят отлагательств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Государственный архив Томской области*. Ф. Р-1860. Оп. 5, Д. 5101. Л. 1–12.
2. *История названий томских улиц* / ответственный редактор Г.Н. Старикова. 3-е изд., доп. Томск : Д-Принт, 2012. С. 211–213, 322–329.
3. *Киселев И.А.* Архитектурные детали в русском зодчестве XVIII–XIX веков. Справочник архитектора-реставратора. Москва, 2005. URL: <http://art-con.ru/node/1091> (дата обращения: 18.12.19).
4. *Киселев И.А.* Отопительные приборы в памятниках архитектуры XVIII–XIX вв. Методические рекомендации. Москва, 1992. С. 3–39.
5. *Ковалевский И.И.* Печное дело. Москва : Профтехиздат, 1961. С. 51–53.
6. *Козлов А.А.* История печного отопления в России. Серия «Камины и печи». Т. V. Москва : АНКО ; Санкт-Петербург : Эксклюзив Стиль, 2017. С. 164.
7. *Льхин Ю.П., Аболина Л.А.* Печи и печное отопление в Восточной Сибири в XVIII – середине XIX века // Известия архитектурно-этнографического музея «Тальцы». Вып. 6. Иркутск : Тальцы, 2013. С. 118–127.
8. *Майничева А.Ю.* Печи сибиряков-старожилов Верхнего Приобья: конструктивные особенности и семантика // Сибирская Заимка : электронный журнал. 1999. URL: <http://zaimka.ru/mainicheva-ovens/>
9. *Методические указания по определению предмета охраны объектов культурного наследия. Книга 2. Методические указания по определению предмета охраны для объектов, предложенных к включению в реестр объектов культурного наследия, выявленных объектов культурного наследия и объектов культурного наследия федерального и регионального значения (памятников истории и культуры) / ООО «ПФ-Градо» ; авторский коллектив: И.С. Кудимов, А.С. Щенков, А.Л. Баталов, Л.И. Лифшиц [и др.].* Москва, 2011. С. 14–15.
10. *Резниченко Т.Ю.* Классификация печей жилых и общественных зданий в России // Избранные доклады 65-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2019. С. 683–687.
11. *Фон Канкрин Франц Людвиг.* Полное эссе об отоплении в новой более совершенной печи, в которой можно сжигать дрова, пучки риса, торфа и камня. Гифен, 1805. С. 155.
12. *Школьник А.Е.* Печное отопление малоэтажных зданий. 2-е изд., перераб. Москва : Высшая школа, 1991. С. 11–13.

REFERENCES

1. Tomsk State Archive. Form R-1860. List 5. Proc. 5101. Pp. 1–12 (rus)
2. *Starikova G.N. (Ed.)* Istoriya nazvanii tomских ulits. Izdanie tret'e, dopolnennoe [History of Tomsk street names]. Tomsk: D-Print, 2012. Pp. 211–213, 322–329. (rus)
3. *Kiselev I.A.* Arkhitekturnye detali v russkom zodchestve XVIII – XIX vekov. Spravochnik arkhitekatora-restavratora [Architectural details in Russian architecture of the 18–19th centuries. Architect and restorer reference book]. Moscow, 2005. Available: <http://art-con.ru/node/1091> (accessed December 18, 2019). (rus)

4. Kiselev I.A. Otopitel'nye pribory v pamyatnikakh arkhitektury XVIII – XIX vv [Heating devices in architectural monuments of the 18–19th centuries. Methodological recommendations]. Moscow, 1992. Pp. 3–39. (rus)
5. Kovalevskii I.I. Pechnoe delo [Stove making]. Moscow: Proftekhizdat, 1961. Pp. 51–53. (rus)
6. Kozlov A.A. Istoriya pechnogo otopeniya v Rossii. Seriya “Kaminy i pechi” [History of furnace heating in Russia. Ser. Fireplaces and Stoves]. Moscow: ANKO; St.-Petersburg: Eksklyuziv Stil', 2017. P. 164. (rus)
7. Lykhin Yu.P., Abolina L.A. Pechi i pechnoe otopenie v Vostochnoi Sibiri v XVIII – seredine XIX veka [Ovens and stove heating in Eastern Siberia in the 18–19th centuries]. Izvestiya arkhitekturno-etnograficheskogo muzeya “Tal'tsy”. Irkutsk: Tal'tsy, 2013. Pp. 118–127 (rus)
8. Mainicheva A.Yu. Pechi sibiryakov-starozhilov Verkhnego Priob'ya: konstruktivnye osobennosti i semantika [Stoves of Siberian old-timers of the Upper Ob region: constructive features and semantics]. *Sibirskaya Zaimka*. 1999. (rus)
9. Kudimov I.S., Shchenkov A.S., Batalov A.L., Lifshits L.I., et al. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu predmeta okhrany ob"ektov kul'turnogo naslediya. Kniga 2 “Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu predmeta okhrany dlya ob"ektov, predlozhennykh k vklyucheniyu v reestr ob"ektov kul'turnogo naslediya, vyvavlenykh ob"ektov kul'turnogo naslediya i ob"ektov kul'turnogo naslediya federal'nogo i regional'nogo znacheniya (pamyatnikov istorii i kul'tury)” [Methodological guidelines for protection of cultural heritage objects. Book 2. Methodological guidelines for protection of objects proposed for inclusion in the register of cultural heritage objects, identified cultural heritage objects and cultural heritage objects of federal and regional significance (historical and cultural monuments)]. Moscow, 2011. Pp. 14–15 (rus)
10. Reznichenko T.Yu. Klassifikatsiya pechei zhilykh i obshchestvennykh zdaniy v Rossii. Izbrannye doklady 65-i Universitetskoj nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchennykh (*Selected Papers 65th Univ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists*). Tomsk: TSUAB, 2019. Pp. 683–687. (rus)
11. Franz Ludwig von Cancrin. Polnoe esse ob otopenii v novoi bolee sovershennoi pechi, v kotoroi mozno szhigat' drova, puchki risa, torfa i kamnya [A complete essay on heating in a new, more advanced furnace to burn wood, rice, peat and stone]. Gifen, 1805. (rus)
12. Shkol'nik A.E. Pechnoe otopenie maloetazhnykh zdaniy [Stove heating of low-rise buildings]. 2nd ed., Moscow: Vysshaya Shkola, 1991. Pp. 11–13. (rus)

Сведения об авторе

Резниченко Татьяна Юрьевна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, reznichenkotanja@mail.ru

Author Details

Tatiana Yu. Reznichenko, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, reznichenkotanja@mail.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-75-91

Л.С. ЛЯХОВИЧ¹, П.А. АКИМОВ^{1,2}, Б.А. ТУХФАТУЛЛИН¹,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Российская академия архитектуры и строительных наук

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КУСОЧНО-ПОСТОЯННЫХ УЧАСТКОВ СТЕРЖНЕЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО УСТОЙЧИВОСТИ ИЛИ НА ВЕЛИЧИНУ ПЕРВОЙ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В опубликованных работах авторов были рассмотрены некоторые особые свойства соответствующих оптимальных систем и сформулированы критерии, позволяющие адекватно оценить близость оптимальных решений к минимально материалоемкому. В частности, были представлены такого рода критерии для стержней с прямоугольным поперечным сечением при заданных ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний. Указанные критерии можно использовать при решении задачи оптимизации, когда поперечные сечения стержня непрерывно изменяются по его длине. Определяемые таким образом оптимальные решения могут рассматриваться как идеализированный объект в смысле предельного. Данная функция оптимального проекта дает возможность оценивать реальное конструкторское решение на основе критерия его близости к предельному (например, по материалоемкости). Такого рода оптимальный проект также может использоваться и как определенный ориентир при реальном проектировании, например, в рамках поэтапного процесса перехода от идеального объекта к реальному. Следует отметить, что при этом на каждом этапе имеется возможность оценить изменения показателя оптимальности объекта по сравнению с начальным и с идеализированным решениями. В частности, один из вариантов соответствующего процесса предусматривает замену непрерывного изменения размеров поперечных сечений стержня по его длине соответствующими кусочно-постоянными участками. Границы этих участков могут выбираться на основе идеального объекта, а размеры поперечных сечений определяться с использованием одного из методов оптимизации. В настоящей статье представлены критерии, дающие возможность достоверно и надежно оценить момент окончания процесса подобной оптимизации.

Ключевые слова: критерий; оптимизация; особые свойства; устойчивость; частота; критическая сила; формы потери устойчивости; формы собственных колебаний; приведенные напряжения.

Для цитирования: Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участ-

ков стержней прямоугольного поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 75–91.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-75-91

L.S. LYAKHOVICH¹, P.A. AKIMOV^{1,2}, B.A. TUKHFATULLIN¹,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

ASSESSMENT CRITERION FOR OPTIMUM DESIGN SOLUTIONS OF PIECEWISE CONSTANT SECTIONS IN RODS OF RECTANGULAR CROSS-SECTION WITH STABILITY OR FIRST EIGEN-FREQUENCY LIMITS

Specific properties of optimum systems have been already considered in previous research. Moreover, the criteria were proposed for a correct assessment of proximity of optimum to minimum material consumption. In particular, the criteria are proposed for rods of rectangular cross-section with stability or first eigen-frequency limits. These criteria can be used for problem optimization, when the rod cross-sections continuously change longitudinally. The obtained optimum solutions can be considered as a perfect limited object. This optimum project function allows researcher to assess the real design solution using the proximity limit criterion (for example, material consumption limit). This kind of optimum design can also be used as a guideline for real design in terms of a stage-by-stage process of transition from a perfect to real object. In this case, it is possible to assess changes in the object optimality at each stage as compared to the initial and idealized solutions. In particular, one of the variants of the process includes replacing the rod with continuous longitudinally varying cross-sections by a rod with piecewise constant sections. The section boundaries can be based on a perfect object, and cross-sections can be determined by one of the optimization methods. This paper presents criteria, which ensure the reliable definition of the time of completion of the optimization process.

Keywords: criterion; optimization; specific properties; stability; frequency; critical force; buckling; eigen-frequency; reduced stresses.

For citation: Lyakyjvich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Kriterij ocenki optimal'nyh reshenij pri formirovanii kusochno-postoyannyh uchastkov sterzhnej pryamougol'nogo poperechnogo secheniya pri ogranicheniah po ustojchivosti ili velichiny pervoj chastoty sobstvnyh kolebanij [Assessment criterion for optimum design solutions of piecewise constant sections in rods of rectangular cross-section with stability or first eigen-frequency limits]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 75–91.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-75-91

В работах по минимизации веса конструкций [1–7], в частности стержней при различных ограничениях, начиная с публикаций Лагранжа [8], Т. Клаузена [9], Е.Л. Николаи [10] и других, формулировались особые свойства оптимальных конструкций [11, 12]. Так, в работе [13] были сформулированы критерии, позволяющие оценивать близость решений по оптимизации стержней прямоугольного поперечного сечения к минимально материалоёмкому проекту при ограничениях по устойчивости или на величину первой ча-

стоты собственных колебаний. Полученные критерии применимы для случая, когда параметры сечений изменяются непрерывно по длине стержня. Несмотря на то что такой оптимальный проект в подавляющем большинстве случаев в прямом виде не реализуется, он, являясь предельным, например, по минимальной материалоемкости, позволяет оценивать принятое конструкторское решение. Кроме того, предельный проект может использоваться как начальная стадия процесса поэтапного движения от идеального объекта к технологически приемлемому проектному решению [13, 14]. В частности, такой процесс может состоять в замене непрерывного изменения размеров поперечных сечений стержня по его длине на кусочно-постоянное. Для этого по длине стержня намечаются участки, в каждом из которых размеры поперечных сечений не меняются. Выбор границ таких участков определяется как технологическими требованиями, так и стремлением приблизиться к минимально материалоемкому решению. После выбора границ участков размеры поперечных сечений определяются на каждом участке одним из методов оптимизации.

В большинстве методов оптимизации за критерий завершения процесса принимается состояние, при котором на очередном шаге соответствующего поиска изменение функции цели оказывается меньше некоторой заранее выбранной малой величины. Однако известны случаи, когда при малом изменении на соседних шагах функции цели координаты точки оптимума заметно изменяются. Очевидно, что наличие критерия, более объективно оценивающего близость решения к оптимуму, повысит уверенность в полученном результате. Такие критерии были сформулированы в работе [13] для оптимизации стержней прямоугольного поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний, когда параметры сечений изменяются непрерывно по длине стержня. Эти критерии позволяют оценивать близость полученного решения к минимально материалоемкому проекту. В настоящей статье предлагаются аналогичные критерии для некоторых случаев проектирования стержней наименьшего веса с прямоугольными кусочно-постоянно изменяющимися по длине стержня поперечными сечениями при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний.

Рассмотрим вывод такого критерия. Заметим, что при этом достаточно сформулировать критерий с ограничением величины первой частоты собственных колебаний, но с учетом влияния продольной силы. Такой критерий может использоваться и тогда, когда вводится только ограничение по устойчивости. В этом случае в выражении критерия значение собственной частоты полагается нулевым. Обозначения размеров поперечного сечения рассматриваемого стержня приведено на рис. 1. Рассматриваются прямолинейные стержни (в том числе и многопролетные) [15–19], несущие массу и нагруженные продольной силой. Стержень разделяется на участки, в пределах каждого из которых

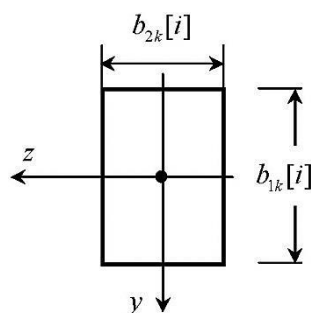


Рис. 1. Обозначения размеров поперечного сечения рассматриваемого стержня

размеры сечений не меняются. Обозначения длин участков и координат их границ приведены на рис. 2.

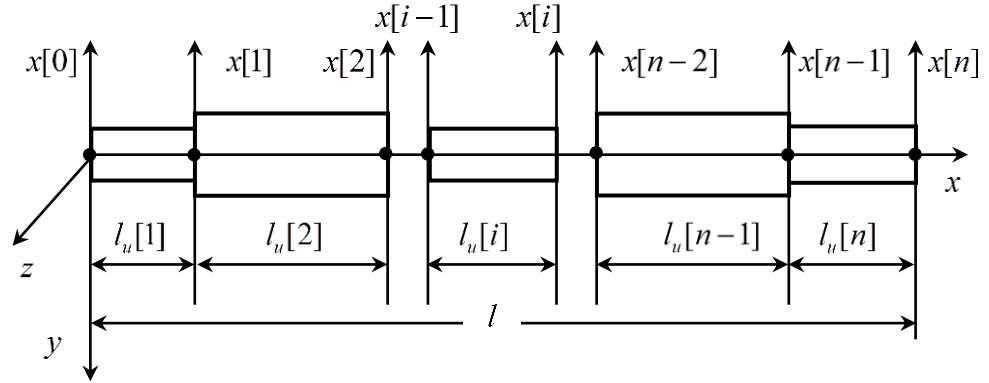


Рис. 2. Обозначения длин участков и координат их границ рассматриваемого стержня

Пусть требуется определить размеры поперечных сечений стержня $b_{1k}[i]$ и $b_{2k}[i]$ ($i=1, 2, \dots, n$), но при условии, чтобы первые частоты в главных плоскостях инерции ($\omega_1[1]$ и $\omega_2[1]$) не были бы меньше заданного значения (ω_0) и чтобы при выбранных границах участков стержня и ограничениях его объём был бы минимальным.

Функция цели (объём материала стержня) запишется в следующем виде:

$$V_0 = \sum_{i=1}^n b_{1k}[i] \cdot b_{2k}[i] \cdot l_u[i]. \quad (1)$$

Ограничения на величину нижней частоты собственных колебаний

$$\omega_0 \leq \omega_1[1], \quad \omega_0 \leq \omega_2[1]$$

с учетом колебаний в двух главных плоскостях инерции поперечного сечения стержня запишется в виде

$$\omega_0 = \omega_1[1] = \omega_2[1]. \quad (2)$$

Известно, что если $\omega_1[1]$ и $\omega_2[1]$ будут первыми частотами собственных колебаний в главных плоскостях инерции, то энергетические функционалы при непрерывном изменении поперечных сечений должны принимать нулевые значения, т. е.

$$\mathfrak{E}_{\omega_1} = \frac{1}{2} \int_0^l \{EI_1(x)(v''_{\omega})^2 - P(x)(v'_{\omega})^2 - \omega^2[m(x) + \rho \cdot F(x)]v_{\omega}^2\} dx = 0; \quad (3)$$

$$\mathfrak{E}_{\omega_2} = \frac{1}{2} \int_0^l \{EI_2(x)(w''_{\omega})^2 - P(x)(w'_{\omega})^2 - \omega^2[m(x) + \rho \cdot F(x)]w_{\omega}^2\} dx = 0, \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала стержня; $I_1(x)$, $I_2(x)$ – соответственно моменты инерции поперечных сечений стержня в главных плоскостях инер-

ции; v_ω , w_ω – координаты форм собственных колебаний в главных плоскостях инерции; ρ – удельная масса материала стержня; $b_1(x)$, $b_2(x)$ – размеры поперечного сечения стержня; $F(x) = b_1(x)b_2(x)$ – площадь поперечного сечения стержня.

При кусочно-постоянном изменении поперечных сечений требования (3) и (4) с учетом ограничения (2) приобретают вид

$$\Theta_{\omega 1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{EI_1[i](v_\omega'')^2 - P[i](v_\omega')^2 - (\omega 1[1])^2[m(x) + \rho \cdot F[i]v_\omega^2]\} dx = 0; \quad (5)$$

$$\Theta_{\omega 2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{EI_2[i](w_\omega'')^2 - P[i](w_\omega')^2 - (\omega 2[1])^2[m(x) + \rho \cdot F[i]w_\omega^2]\} dx = 0, \quad (6)$$

где $I_1[i]$, $I_2[i]$ – моменты инерции поперечных сечений стержня в главных плоскостях инерции; $b_{1k}[i]$, $b_{2k}[i]$ – размеры поперечного сечения стержня; $F[i] = b_{1k}[i]b_{2k}[i]$ – площадь поперечного сечения стержня.

Итак, требуется отыскать значения $b_{1k}[i]$, $b_{2k}[i]$, которые придадут функции (1) минимальное значение при выполнении условий (5), (6).

Таким образом, мы имеем параметрическую задачу.

Выражение, экстремум которого обеспечит минимум функции (1) и выполнение условий (5), (6), запишется в виде

$$\begin{aligned} V_{0\omega} = & \sum_{i=1}^n b_{1k}[i]b_{2k}[i]l_u[i] - \sum_{i=1}^n \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [E \frac{b_{1k}^3[i] \cdot b_{2k}[i]}{12} (v_\omega'')^2 - \\ & - P[i](v_\omega')^2 - (\omega 1[1])^2(m(x) + \rho \cdot b_{1k}[i]b_{2k}[i]v_\omega^2)] - \\ & - \lambda_{\omega 2} [E \frac{b_{1k}[i]b_{2k}^3[i]}{12} (w_\omega'')^2 - P[i](w_\omega')^2 - \\ & - (\omega 2[1])^2(m(x) + \rho \cdot b_{1k}[i]b_{2k}[i]w_\omega^2)] \} dx, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\lambda_{\omega 1}$ и $\lambda_{\omega 2}$ – произвольные множители (в рассматриваемой параметрической задаче множители $\lambda_{\omega 1}$ и $\lambda_{\omega 2}$ – постоянные величины).

Очевидно, что вариации выражения (7) по $\lambda_{\omega 1}$ и $\lambda_{\omega 2}$ приведут к выполнению условий (5) и (6), а следовательно, и ограничения (2).

Для отыскания минимума выражения (7) при условиях (5), (6) запишем систему уравнений

$$\frac{\partial V_{0\omega}}{\partial b_{1k}[i]} = 0; \quad \frac{\partial V_{0\omega}}{\partial b_{2k}[i]} = 0, \dots \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Запишем i -ю пару уравнений:

$$\frac{\partial V_{0\omega}}{\partial b_{1k}[i]} = b_{2k}[i]l_u[i] - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \lambda_{\omega 1} [E \frac{b_{1k}^2[i]b_{2k}[i]}{4} (v_\omega'')^2 -$$

$$\begin{aligned}
& - \{(\omega_1[1])^2 \rho \cdot b_{2k}[i] v_\omega^2\} - \lambda_{\omega 2} [E \frac{b_{2k}^3[i]}{12} (w_\omega'')^2 - (\omega_2[1])^2 \rho \cdot b_{2k}[i] w_\omega^2] dx = 0; \\
& \frac{\partial V_{0\omega}}{\partial b_{2k}[i]} = b_{1k}[i] l_u[i] - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [E \frac{b_{1k}^3[i]}{12} (v_\omega'')^2 - \\
& - (\omega_1[1])^2 \rho \cdot b_{1k}[i] v_\omega^2] - \lambda_{\omega 2} [E \frac{b_{1k}[i] b_{2k}^2[i]}{4} (w_\omega'')^2 - (\omega_2[1])^2 \rho \cdot b_{1k}[i] w_\omega^2] dx = 0.
\end{aligned}$$

Разделив все члены первого уравнения на $b_{2k}[i]$, а второго на $b_{1k}[i]$ и выполнив простые преобразования, получим

$$\begin{aligned}
& \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [E \frac{b_{1k}^2[i]}{4} (v_\omega'')^2 - (\omega_1[1])^2 \rho \cdot v_\omega^2] + \lambda_{\omega 2} [E \frac{b_{2k}^2[i]}{12} (w_\omega'')^2 - \\
& - (\omega_2[1])^2 \rho \cdot w_\omega^2] \} dx = l_u[i]; \\
& \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [E \frac{b_{1k}^2[i]}{12} (v_\omega'')^2 - (\omega_1[1])^2 \rho \cdot v_\omega^2] + \lambda_{\omega 2} [E \frac{b_{2k}^2[i]}{4} (w_\omega'')^2 - \\
& - (\omega_2[1])^2 \rho \cdot w_\omega^2] \} dx = l_u[i].
\end{aligned}$$

Умножив все члены полученных уравнений на E и учитывая, что

$$\sigma_1(x) = E \cdot b_1(x)(v_\omega'') / 2, \quad \sigma_2(x) = E \cdot b_2(x)(w_\omega'') / 2, \quad (8)$$

можем переписать уравнения в виде

$$\begin{aligned}
& \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [\sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega_1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_\omega^2] + \lambda_{\omega 2} [\frac{1}{3} \sigma_{2\omega}^2(x) - \\
& - (\omega_2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_\omega^2] \} dx = l_u[i] E; \\
& \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [\frac{1}{3} \sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega_1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_\omega^2] + \lambda_{\omega 2} [\sigma_{2\omega}^2(x) - \\
& - (\omega_2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_\omega^2] \} dx = l_u[i] E,
\end{aligned} \quad (9)$$

где $\sigma_{1\omega}(x)$ и $\sigma_{2\omega}(x)$ – нормальные напряжения в крайних волокнах стержня от изгибающих моментов, возникающих при собственных колебаниях в главных плоскостях инерции (эти напряжения, так же, как и перемещения v_ω и w_ω , определены с точностью до постоянного множителя).

Взяв разность уравнений (9), получим

$$\frac{2}{3} \lambda_{\omega 1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2(x) dx - \frac{2}{3} \lambda_{\omega 2} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2(x) dx = 0. \quad (10)$$

Из (10) следует

$$\lambda_{\omega 1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2(x) dx = \lambda_{\omega 2} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2(x) dx. \quad (11)$$

В свою очередь, из (11) следует

$$\lambda_{\omega 1} = \lambda_{\omega 2} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \right)^{-1}; \quad \lambda_{\omega 2} = \lambda_{\omega 1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1}. \quad (12)$$

На основе (11) и (12) уравнения (9) запишутся в виде

$$\begin{aligned} & \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [\sigma_{1\omega}^2(x) dx - (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2] + \lambda_{\omega 2} \frac{1}{3} \sigma_{2\omega}^2(x) - \\ & \quad - \lambda_{\omega 2} (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 \} dx = l_u[i]E; \\ & \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} [\frac{1}{3} \sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2] + \lambda_{\omega 2} \cdot \sigma_{2\omega}^2(x) - \\ & \quad - \lambda_{\omega 2} (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 \} dx = l_u[i]E; \end{aligned}$$

или, преобразовывая, можем последовательно записать:

$$\begin{aligned} & \lambda_{\omega 1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{1\omega}^2(x) dx - (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2] dx + \\ & + \frac{1}{3} \lambda_{\omega 1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2(x) dx - \\ & - \lambda_{\omega 1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 dx = l_u[i]E; \\ & \frac{1}{3} \lambda_{\omega 2} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \right)^{-1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2(x) dx - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \lambda_{\omega 1} (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2 dx + \\ & + \lambda_{\omega 2} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{2\omega}^2(x) - (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2] dx = l_u[i]E; \\ & \lambda_{\omega 1} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \frac{4}{3} \sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2 - \\ & - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 \} dx = l_u[i]E; \\ & \lambda_{\omega 2} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \frac{4}{3} \sigma_{2\omega}^2(x) - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \right)^{-1} \times \\ & \times (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2 - (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 \} dx = l_u[i]E. \end{aligned} \quad (13)$$

Так как $\lambda_{\omega 1}, \lambda_{\omega 2}, E$ постоянные величины, перепишем (13) в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left\{ \frac{4}{3} \sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2 - \right. \\ & \left. - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 \right\} dx = E = \text{const}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left\{ \frac{4}{3} \sigma_{2\omega}^2(x) - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \right)^{-1} \right. \\ & \left. \times (\omega 1[1])^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2 - (\omega 2[1])^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 \right\} dx = E = \text{const} \end{aligned}$$

или, подставив $\omega_0 = \omega 1[1] = \omega 2[1]$ и поделив на $4/3$, получим

$$\begin{aligned} & \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{4} (\omega_0)^2 E \cdot \rho (v_{\omega}^2 + \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} w_{\omega}^2) \right] dx = \text{const}; \\ & \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{4} (\omega_0)^2 E \cdot \rho \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} v_{\omega}^2 + w_{\omega}^2 \right) \right] dx = \text{const}. \end{aligned} \quad (15)$$

Если граничные условия в главных плоскостях инерции одинаковы, то $v_{\omega} = w_{\omega}$, $\sigma_{1\omega} = \sigma_{2\omega}$ и (15) принимают вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{2} (\omega_0)^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2 \right] dx = \text{const}; \\ & \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{2} (\omega_0)^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2 \right] dx = \text{const}. \end{aligned} \quad (16)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} S_1[i] &= \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{4} (\omega_0)^2 E \cdot \rho (v_{\omega}^2 + \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} w_{\omega}^2) \right] dx; \\ S_2[i] &= \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{4} (\omega_0)^2 E \cdot \rho \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} v_{\omega}^2 + w_{\omega}^2 \right) \right] dx. \end{aligned}$$

Таким образом, (15) запишется в виде

$$\begin{aligned} S_1[i] &= \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{4} (\omega_0)^2 E \cdot \rho \times \right. \\ & \left. \times (v_{\omega}^2 + \int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} w_{\omega}^2) \right] dx = \text{const}; \end{aligned}$$

$$S_2[i] = \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{4}(\omega_0)^2 E \cdot \rho \times$$

$$\times \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{1\omega}^2 dx \left(\int_{x[i-1]}^{x[i]} \sigma_{2\omega}^2 dx \right)^{-1} v_{\omega}^2 + w_{\omega}^2 \right) dx = \text{const}, \quad (17)$$

а (16) в виде

$$S_1[i] = \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{2}(\omega_0)^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2] dx = \text{const};$$

$$S_2[i] = \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{2}(\omega_0)^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2] dx = \text{const}. \quad (18)$$

Оба уравнения (16) становятся идентичными. Тем не менее для построения алгоритмов реализации критерия (16) сохранение двух уравнений целесообразно.

Если собственные колебания рассматриваются только в одной из главных плоскостей инерции, то на основе (9) критерии представляются в виде

$$S_1[i] = \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega_0)^2 E \cdot \rho \cdot v_{\omega}^2] dx = \text{const};$$

$$S_2[i] = \frac{1}{l_u[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{2\omega}^2(x) - (\omega_0)^2 E \cdot \rho \cdot w_{\omega}^2] dx = \text{const}. \quad (19)$$

Значения $S_1[i]$ и $S_2[i]$ целесообразно нормировать. Один из вариантов нормирования, например $S_1[i]$ ($i=1, 2, \dots, n$), сводится к выбору в этом ряду наибольшего значения и деления на него всех членов ряда. Таким образом, в ряду не будет величин, больших единицы. Близость решения к оптимуму будет оцениваться по близости значений $S_1[i]$ к единице. Аналогично нормируется и ряд $S_2[i]$.

Сравним критерии (17) – (19), полученные при кусочно-постоянном изменении прямоугольных поперечных сечений с аналогичными критериями при непрерывном их изменении. Эти критерии получены в работе [13] и имеют вид

$$\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{4} E \cdot \rho (\omega_0 \cdot k_{\omega})^2 (v_{\omega}^2 + \frac{\sigma_{1\omega}^2}{\sigma_{2\omega}^2} w_{\omega}^2) = \text{const};$$

$$\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{4} E \cdot \rho (\omega_0 \cdot k_{\omega})^2 (\frac{\sigma_{2\omega}^2}{\sigma_{1\omega}^2} v_{\omega}^2 + w_{\omega}^2) = \text{const} \quad (20)$$

или

$$\bar{\sigma}_{1\omega} = \sqrt{\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{4} E \cdot \rho (\omega_0 \cdot k_{\omega})^2 (v_{\omega}^2 + \frac{\sigma_{1\omega}^2}{\sigma_{2\omega}^2} w_{\omega}^2)} = \text{const};$$

$$\bar{\sigma}_{2\omega} = \sqrt{\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{4} E \cdot \rho (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 \left(\frac{\sigma_{2\omega}^2}{\sigma_{1\omega}^2} v_\omega^2 + w_\omega^2 \right)} = \text{const.} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{2} (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot v_\omega^2 &= \text{const}; \\ \sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{2} (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot w_\omega^2 &= \text{const} \end{aligned} \quad (22)$$

или

$$\bar{\sigma}_{1\omega} = \sqrt{\sigma_{1\omega}^2(x) - \frac{3}{2} (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot v_\omega^2} = \text{const}; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{2\omega} &= \sqrt{\sigma_{2\omega}^2(x) - \frac{3}{2} (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot w_\omega^2} = \text{const.} \\ \sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot v_\omega^2 &= \text{const}; \\ \sigma_{2\omega}^2(x) - (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot w_\omega^2 &= \text{const.} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{1\omega} &= \sqrt{\sigma_{1\omega}^2(x) - (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot v_\omega^2} = \text{const}; \\ \bar{\sigma}_{2\omega} &= \sqrt{\sigma_{2\omega}^2(x) - (\omega_0 \cdot k_\omega)^2 E \cdot \rho \cdot w_\omega^2} = \text{const.} \end{aligned} \quad (25)$$

Каждый из критериев представлен в двух вариантах. Вторые варианты представления критериев необязательны. Они были представлены лишь для того, чтобы подчеркнуть их связь с ранее сформулированными критериями (например, в [10]), где признаком оптимальности при ограничениях по устойчивости служило постоянство напряжений в крайних волокнах стержня от изгибающих моментов, возникающих при потере устойчивости.

Использование вторых вариантов критериев при ограничениях на величину низшей частоты собственных колебаний для оценки процесса оптимизации на начальных стадиях поиска может привести к отрицательным значениям подкоренных выражений. Поэтому для избегания сбоев вычислительного процесса следует использовать первые варианты представления критериев.

Как отмечалось выше, сформулированные критерии могут использоваться и тогда, когда вводится только ограничение по устойчивости. В этом случае в выражениях критериев значение собственной частоты полагается нулевым.

Сравнение критериев (17) – (19), полученных при кусочно-постоянном изменении прямоугольных поперечных сечений, с аналогичными критериями при непрерывном их изменении (20), (22) и (24), показывает, что под интегралами в (18) и (19) стоят соответственно выражения (22) и (24), а в (17) модифицированное выражение (20). Критерии $S_1[i]$ и $S_2[i]$ содержат множитель $1/l_u[i]$. Поэтому критерии (18) и (19) могут рассматриваться на каждом кусочно-постоянном участке как среднее значение соответственно критериев (21) и (22) на единицу длины участка, аналогично рассматривается и критерий (17) на основе модифицированного критерия (20). Если использовать отме-

ченную взаимосвязь критериев для определения значений $S_1[i]$ и $S_2[i]$, то затем также целесообразно выполнять нормирование этих величин для оценки их близости к единице.

Пример 1. Рассмотрим прямолинейный консольный стержень пролетом $l = 6$ м прямоугольного сечения, нагруженный продольной силой $P = 300000$ Н и несущий распределенную массу интенсивностью $m(x) = 75$ кг/м. При переходе к дискретной модели из 25 участков узловая масса составит 18 кг. Удельная масса $\rho = 2400$ кг/м³. Заданная величина первой круговой собственной частоты $\omega_0 = 20$ с⁻¹, модуль упругости материала стержня $E = 24000$ МПа (рис. 3, а) [15, 20].

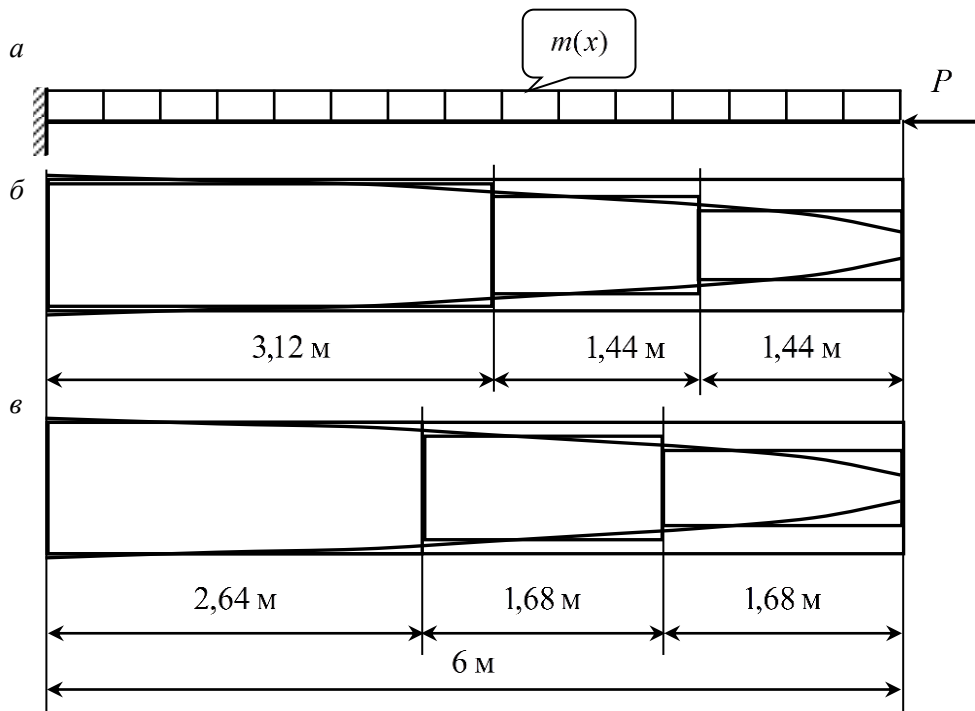


Рис. 3. К примеру 1

Так как граничные условия в обеих главных плоскостях инерции одинаковы, при оптимизации сечения должны оказаться квадратными.

Рассмотрим вначале использование критерия (22) для оценки этапов оптимизации [8–14, 20, 21] для случая, когда сечения изменяются непрерывно. Оптимизацию выполним методом случайного поиска. За начальное приближение принят стержень постоянного по длине сечения при соотношении $b_1^0[i]/b_2^0[i] = 1/1$. Значения искомых параметров при первом выходе на границу области допустимых решений оказались равными $b_1^0[i] = b_2^0[i] = 0,3039$ м. При этом функция цели равна $V_0 = 0,5543$ м³. Результаты трех этапов поиска сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сведения о ходе решения примера 1

№ п/п	Этапы оптимизации						
	Исходный	Первый $n = 1000$		Второй $n = 1500$		Третий $n > 2000$	
	$b_1^0[i], \text{ м}$	$b_1[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$b_1[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$b_1[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,3039	0,3072	0,8359	0,3065	0,8414	0,3076	0,9997
2	0,3039	0,3057	0,7926	0,3050	0,8019	0,3038	0,9996
3	0,3039	0,2983	0,8491	0,2986	0,8513	0,2998	0,9997
4	0,3039	0,2995	0,7622	0,2973	0,8012	0,2956	0,9996
5	0,3039	0,2917	0,8206	0,2886	0,8722	0,2912	0,9996
6	0,3039	0,2865	0,8249	0,2883	0,7992	0,2865	0,9996
7	0,3039	0,2815	0,8224	0,2867	0,7404	0,2815	0,9995
8	0,3039	0,2754	0,8447	0,2761	0,8280	0,2762	0,9997
9	0,3039	0,2723	0,7922	0,2693	0,8456	0,2706	0,9996
10	0,3039	0,2653	0,8185	0,2639	0,8354	0,2646	0,9995
11	0,3039	0,2599	0,7917	0,2562	0,8666	0,2582	0,9999
12	0,3039	0,2529	0,7966	0,2515	0,8218	0,2515	0,9997
13	0,3039	0,2425	0,8649	0,2403	0,9168	0,2442	0,9998
14	0,3039	0,2383	0,7819	0,2390	0,7693	0,2364	0,9998
15	0,3039	0,2238	0,9477	0,2265	0,8634	0,2281	0,9996
16	0,3039	0,2217	0,7673	0,2196	0,8155	0,2193	0,9998
17	0,3039	0,2071	0,9186	0,2112	0,7779	0,2097	0,9997
18	0,3039	0,1972	0,9097	0,2022	0,7275	0,1995	0,9996
19	0,3039	0,1885	0,8326	0,1898	0,7655	0,1885	0,9997
20	0,3039	0,1739	0,9330	0,1717	1,0000	0,1765	1,0000
21	0,3039	0,1598	1,0000	0,1636	0,7799	0,1634	0,9996
22	0,3039	0,1486	0,8121	0,1481	0,8078	0,1486	0,9994
23	0,3039	0,1328	0,6891	0,1320	0,7145	0,1315	0,9993
24	0,3039	0,1181	0,1642	0,1134	0,4544	0,1099	0,9988
25	0,3039	0,0964	-0,6147	0,0889	-0,3683	0,0761	0,9994
$V_0, \text{ м}^3$	0,5543	0,3397	–	0,3391	–	0,3384	–
%	0	38,71	–	38,83	–	38,95	–

Результаты первого этапа получены после $n=1000$ попыток метода случайного поиска, второго – после $n=1500$ попыток, третьего при $n > 2000$. Во втором столбце табл. 1 приведены значения размеров сечения при первом выходе на границу области допустимых решений $b_1^0[i] = b_2^0[i] = 0,3039$ м. В предпоследней строке таблицы приводятся величины функции цели V_0 на каждом из этапов, а в последней – ее снижение в процентах по сравнению с исходным. В столбцах 3, 5, 7 приведены размеры сечений, полученные на каждом из эта-

пов, а в столбцах 4, 6, 8 – значения критерия (22). Из таблицы видно, что значения функции цели по сравнению с первым этапом почти не снижаются. Отличия касаются лишь четвёртой значимой цифры. Разница в размерах некоторых сечений касается третьих значимых цифр. Однако значения критерия (22) на первом и втором этапах свидетельствуют, что процесс оптимизации не закончен.

Величины критерия (22) на третьем этапе близки к единице, что позволяет уверенно принимать решение об остановке процесса оптимизации на этом этапе.

Полученные результаты определяют стержень минимальной материалоемкости. Очертания изменения размеров сечений этого стержня ($b_1[i]$) показаны на рис. 3, б, в.

Если технологические требования не допускают такой закон изменения размеров сечений, но допускают кусочно-постоянное изменение сечений, то выбор границ таких участков определяется не только технологическими требованиями, но и стремлением приблизиться к минимально материалоемкому решению. Предположим, что технологические требования допускают проектирование стержня из трёх участков, в каждом из которых размеры поперечных сечений не меняются. Предположим, что еще дополнительно вводятся и ограничения на величину длин участков, например такие как $2,8 \text{ м} \leq l_u[2] \leq 3,8 \text{ м}$, $l_u[1] = l_u[3] = (l - l_u[2]) / 2$.

Рассмотрим два варианта границ участков. Варианты границ участков и соответствующие им размеры сечений, полученные оптимизацией, показаны на рис. 3, б, в и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сведения о вариантах решения примера 1

№ п/п	Вариант 1			Вариант 2		
	$b_{1k}[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$S_1[i]$	$b_1[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$S_1[i]$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,2901	0,4123	0,9999	0,2956	0,3627	0,9999
2	0,2901	0,3811	0,9999	0,2956	0,3357	0,9999
3	0,2901	0,3502	0,9999	0,2956	0,3090	0,9999
4	0,2901	0,3198	0,9999	0,2956	0,2827	0,9999
5	0,2901	0,2900	0,9999	0,2956	0,2570	0,9999
6	0,2901	0,2609	0,9999	0,2956	0,2319	0,9999
7	0,2901	0,2327	0,9999	0,2956	0,2075	0,9999
8	0,2901	0,2053	0,9999	0,2956	0,1838	0,9999
9	0,2901	0,1790	0,9999	0,2956	0,1610	0,9999
10	0,2901	0,1536	0,9999	0,2956	0,1390	0,9999
11	0,2901	0,1293	0,9999	0,2956	0,1179	0,9999
12	0,2901	0,1060	0,9999	0,2346	0,4226	0,9998
13	0,2901	0,0837	0,9999	0,2346	0,3539	0,9998
14	0,2190	0,4363	1,0000	0,2346	0,2888	0,9998

Окончание табл. 2

№ п/п	Вариант 1			Вариант 2		
	$b_{1k}[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$S_1[i]$	$b_1[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$S_1[i]$
1	2	3	4	5	6	7
15	0,2190	0,3496	1,0000	0,2346	0,2275	0,9998
16	0,2190	0,2685	1,0000	0,2346	0,1702	0,9998
17	0,2190	0,1934	1,0000	0,2346	0,1167	0,9998
18	0,2190	0,1242	1,0000	0,2346	0,0670	0,9998
19	0,2190	0,0609	1,0000	0,1570	1,0000	1,0000
20	0,1474	1,0000	0,9998	0,1570	0,6696	1,0000
21	0,1474	0,6081	0,9998	0,1570	0,3794	1,0000
22	0,1474	0,2761	0,9998	0,1570	0,1370	1,0000
23	0,1474	0,0145	0,9998	0,1570	-0,0541	1,0000
24	0,1474	-0,1737	0,9998	0,1570	-0,1948	1,0000
25	0,1474	-0,2925	0,9998	0,1570	-0,2900	1,0000
$V_0, \text{ м}^3$	0,3630	–	–	0,3645	–	–
%	34,52	–	–	34,24	–	–

В столбцах 2 и 5 показаны размеры сечений $b_{1k}[i] = b_{2k}[i]$ соответствующих вариантов. В столбцах 3 и 6 приводятся значения критерия (22), а в столбцах 4 и 7 – критерия (18). Оба критерия приводятся потому, что, как отмечалось выше, на каждом кусочно-постоянном участке критерий (18) реализуется как среднее значение критерия (22) на единицу длины участка.

Значения критерия (18) в обоих вариантах оказались близки к единице, что свидетельствовало о возможности завершать процессы оптимизации.

Функция цели у минимально материалоёмкого решения (табл. 1, столбец 7) $V_0 = 0,3384 \text{ м}^3$, что на 38,95 % меньше, чем у исходного варианта, у которого $V_0 = 0,5543 \text{ м}^3$ (табл. 1, столбец 2).

В первом варианте границ кусочно-постоянного изменения размеров функция цели $V_0 = 0,3630 \text{ м}^3$, что на 34,52 % меньше, чем у исходного варианта. Во втором функция цели $V_0 = 0,3645 \text{ м}^3$, что на 34,24 % меньше, чем у исходного варианта. Таким образом, менее материалоёмким оказывается первый вариант выбора границ участков. Отметим, что минимально материалоёмкий вариант содействовал выбору границ участков, позволяя выбирать варианты, наиболее к нему приближенные.

Теоретические результаты данной статьи в англоязычном варианте представлены в работе [22], а примеры в работе [23].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boslovyak P.V., Emelyanova G.A. Optimization Mathematical Modeling of the Weight of Metal Structure of Suspended Belt Conveyor Linear Section // IFAC-PapersOnLine. 2018. V. 51. I. 30. P. 616–619.

2. Hansel W., Treptow A., Becker W., Freisleben B. A heuristic and a genetic topology optimization algorithm for weight-minimal laminate structures // *Composite Structures*. 2002. V. 58. I. 2. P. 287–294.
3. Jonsson B., Barsoum Z., Sperle J.-O. Weight optimization and fatigue design of a welded bogie beam structure in a construction equipment // *Engineering Failure Analysis*. 2012. V. 19. P. 63–76.
4. Navarrina F., Muinos I., Colominas I., Casteleiro M. Topology optimization of structures: A minimum weight approach with stress constraints // *Advances in Engineering Software*. 2005. V. 36. I. 9. P. 599–606.
5. Park C.H., Saouab A., Breard J., Han W.S., Vautrin A., Lee W.I. An integrated optimisation for the weight, the structural performance and the cost of composite structures // *Composites Science and Technology*. 2009. V. 69. I. 7–8. P. 1101–1107.
6. Praveen V., Dayan G.M., Kumar A.S. A multi-objective design optimization technique for weight and cost minimization of hybrid laminated composite structure by modified non-dominated sorting genetic algorithm // *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5. I. 12. Part 1. P. 25798–25806.
7. Winklberger M., Heftberger P., Sattler M., Schagerl M. Fatigue strength and weight optimization of threaded connections in tie-rods for aircraft structures // *Procedia Engineering*. 2018. V. 213. P. 374–382.
8. Lagrange J.-L. Sur la figure des colonnes // *Mesclane Taurinensia*. 1770–1773. V. 5, P. 123.
9. Clausen T. Über die form architektonischer Säulen // *Bull. cl. physico-math. Acad. St.-Petersburg*. 1851. V. 9. P. 371–380.
10. Николаи Е.Л. Задача Лагранжа о наивыгоднейшем очертании колонны // *Известия Санкт-Петербургского политехнического института*. 1907. № 8.
11. Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. О задачах поиска минимума и максимума в строительной механике // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. V. 13. I. 2. P. 103–124.
12. Lyakhovich L.S., Malinovsky A.P., Tukhfatullin B.A. Criteria for Optimal Strengthening of Bar Flange with I-type Cross-section with Stability Constraints on the Value of the First Natural Frequency // *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. P. 427–433.
13. Ляхович Л.С. Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Издательство Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2009. 372 с.
14. Ляхович Л.С., Перельмутер А.В. Некоторые вопросы оптимального проектирования строительных конструкций // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014. V. 10. I. 2. P. 14–23.
15. Aslami M., Akimov P.A. Analytical solution for beams with multipoint boundary conditions on two-parameter elastic foundations // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. V. 16. I. 4. P. 668–677.
16. Khasawneh F.A., Segalman D. Exact and numerically stable expressions for Euler-Bernoulli and Timoshenko beam modes // *Applied Acoustics*. 2019. V. 151. P. 215–228.
17. Peradze J. On the approximate solution of a Kirchhoff type static beam equation // *Transactions of A. Razmadze Mathematical Institute*. 2016. V. 170. I. 2. P. 266–271.
18. Reali A., Gomez H. An isogeometric collocation approach for Bernoulli–Euler beams and Kirchhoff plates // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. V. 284. P. 623–636.
19. Wang D., Liu W., Zhang H. Superconvergent isogeometric free vibration analysis of Euler – Bernoulli beams and Kirchhoff plates with new higher order mass matrices // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. V. 286. P. 230–267.
20. Ludeker J.K., Kriegesmann B. Fail-safe optimization of beam structures // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2019. V. 6. I. 3. P. 260–268.
21. Quinteiro G.F. Beam optimization: improving methodology // *Annals of Nuclear Energy*. 2004. V. 31. I. 4. P. 399–411.
22. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first

natural frequency. Part 1: theoretical foundations // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. P. 88–100.

23. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 2: numerical examples // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. P. 101–110.

REFERENCES

1. Boslovyak P.V., Emelyanova G.A. Optimization mathematical modeling of the weight of metal structure of suspended belt conveyor linear section. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. V. 51. No. 30. Pp. 616–619.
2. Hansel W., Treptow A., Becker W., Freisleben B. A heuristic and a genetic topology optimization algorithm for weight-minimal laminate structures. *Composite Structures*. 2002. V. 58. No. 2. Pp. 287–294.
3. Jonsson B., Barsoum Z., Sperle J.-O. Weight optimization and fatigue design of a welded bogie beam structure in a construction equipment. *Engineering Failure Analysis*. 2012. V. 19. Pp. 63–76.
4. Navarrina F., Muinos I., Colominas I., Casteleiro M. Topology optimization of structures: A minimum weight approach with stress constraints. *Advances in Engineering Software*. 2005. V. 36. No. 9. Pp. 599–606.
5. Park C.H., Saouab A., Breard J., Han W.S., Vautrin A., Lee W.I. An integrated optimisation for the weight, the structural performance and the cost of composite structures. *Composites Science and Technology*. 2009. V. 69. No. 7–8. Pp. 1101–1107.
6. Praveen V., Dayan G.M., Kumar A.S. A multi-objective design optimization technique for weight and cost minimization of hybrid laminated composite structure by modified non-dominated sorting genetic algorithm. *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5. No. 12. Pp. 25798–25806.
7. Winklberger M., Heftberger P., Sattler M., Schagerl M. Fatigue strength and weight optimization of threaded connections in tie-rods for aircraft structures. *Procedia Engineering*. 2018. V. 213. Pp. 374–382.
8. Lagrange J.-L. Sur la figure des colonnes. *Miscellanea Taurinensia*. 1770–1773. V. 5, P. 123.
9. Clausen T. Über die form architektonischer Säulen. *Bull. cl. physico-math. Acad. St.-Petersburg*, 1851. V. 9. Pp. 371–380.
10. Nikolai E.L. Zadacha Lagranzha o naivygodneishem ochertanii kolonny [The Lagrange problem of the best shape of the column]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo instituta*. 1907. No. 8. (rus)
11. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. O zadachakh poiska minimuma i maksimuma v stroitel'noi mekhanike [About hill-climbing problems in structural mechanics]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. V. 13. No. 2. Pp. 103–124. (rus)
12. Lyakhovich L.S., Malinovsky A.P., Tukhfatullin B.A. Criteria for optimal strengthening of bar flange with I-type cross-section with stability constraints on the value of the first natural frequency. *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. Pp. 427–433.
13. Lyakhovich L.S. Osobyie svoystva optimal'nykh sistem i osnovnye napravleniya ikh realizatsii v metodakh rascheta sooruzhenii [Specific properties of optimum systems using methods of structural analysis]. Tomsk: TSUAB, 2009. 372 p. (rus)
14. Lyakhovich L.S., Perelmuter A.V. Nekotorye voprosy optimal'nogo proektirovaniya stroitel'nykh konstruksii [Optimum building design]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014. V. 10. No. 2. Pp. 14–23. (rus)
15. Aslami M., Akimov P.A. Analytical solution for beams with multipoint boundary conditions on two-parameter elastic foundations. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. V. 16. No. 4. Pp. 668–677.
16. Khasawneh F.A., Segalman D. Exact and numerically stable expressions for Euler-Bernoulli and Timoshenko beam modes. *Applied Acoustics*. 2019. V. 151. Pp. 215–228.
17. Peradze J. On the approximate solution of a Kirchhoff type static beam equation. *Transactions of A. Razmadze Mathematical Institute*. 2016. V. 170. No. 2. Pp. 266–271.

18. Realı A., Gomez H. An isogeometric collocation approach for Bernoulli–Euler beams and Kirchhoff plates. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. V. 284. Pp. 623–636.
19. Wang D., Liu W., Zhang H. Superconvergent isogeometric free vibration analysis of Euler–Bernoulli beams and Kirchhoff plates with new higher order mass matrices. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. V. 286. Pp. 230–267.
20. Ludeker J.K., Kriegesmann B. Fail-safe optimization of beam structures. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2019. V. 6. No. 3. Pp. 260–268.
21. Quinteiro G.F. Beam optimization: improving methodology. *Annals of Nuclear Energy*. 2004. V. 31. No. 4. Pp. 399–411.
22. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 1: theoretical foundations. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. No. 4. Pp. 88–100.
23. Lyakhovich L.S., P.A. Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 2: Numerical examples. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. No. 4. Pp. 101–110.

Сведения об авторах

Ляхович Леонид Семенович, докт. техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lls@tsuab.ru

Акимов Павел Алексеевич, докт. техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; главный ученый секретарь президиума, Российская академия архитектуры и строительных наук, 107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, 24, стр. 1, akimov@raasn.ru

Тухфатуллин Борис Ахатович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, bat9203@gmail.com

Authors Details

Leonid S. Lyakhovich, DSc, Professor, Academy Fellow of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Department of Structural Mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lls@tsuab.ru

Pavel A. Akimov, DSc, Professor, Chief Academic Secretary, Academy Fellow of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Department of Structural Mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building; 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, akimov@raasn.ru

Boris A. Tukhfatullin, PhD, A/Professor, Department of Structural Mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, bat9203@gmail.com

УДК 624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-92-105

*Л.С. ЛЯХОВИЧ¹, П.А. АКИМОВ^{1,2}, Б.А. ТУХФАТУЛЛИН¹,**¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,**²Российская академия архитектуры и строительных наук*

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КУСОЧНО-ПОСТОЯННЫХ УЧАСТКОВ ПОЛКИ СТЕРЖНЕЙ ДВУТАВРОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО УСТОЙЧИВОСТИ ИЛИ НА ВЕЛИЧИНУ ПЕРВОЙ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В опубликованных работах авторов были рассмотрены некоторые особые свойства соответствующих оптимальных систем и сформулированы критерии, позволяющие адекватно оценить близость оптимальных решений к минимально материалоемкому. В частности были представлены такого рода критерии для стержней с двутавровым поперечным сечением при заданных ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний.

Указанные критерии можно использовать при решении задачи оптимизации, когда поперечные сечения стержня непрерывно изменяются по его длине. Определяемые таким образом оптимальные решения могут рассматриваться как идеализированный объект в смысле предельного. Данная функция оптимального проекта дает возможность оценивать реальное конструкторское решение на основе критерия его близости к предельному (например, по материалоемкости).

Такого рода оптимальный проект также может использоваться и как определенный ориентир при реальном проектировании, например, в рамках поэтапного процесса перехода от идеального объекта к реальному.

Следует отметить, что при этом на каждом этапе имеется возможность оценить изменения показателя оптимальности объекта по сравнению с начальным и с идеализированным решениями. В частности, один из вариантов соответствующего процесса предусматривает замену непрерывного изменения размеров поперечных сечений стержня по его длине соответствующими кусочно-постоянными участками. Границы этих участков могут выбираться на основе идеального объекта, а размеры поперечных сечений определяться с использованием одного из методов оптимизации. В настоящей статье представлены критерии, дающие возможность достоверно и надежно оценить момент окончания процесса подобной оптимизации.

Ключевые слова: критерий; оптимизация; особые свойства; устойчивость; частота; критическая сила; формы потери устойчивости; формы собственных колебаний; приведённые напряжения.

Для цитирования: Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков полки стержней двутаврового поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 92–105.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-92-105

L.S. LYAKHOVICH¹, P.A. AKIMOV^{1,2}, B.A. TUKHFATULLIN¹,

¹*Tomsk State University of Architecture and Building,*

²*Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*

ASSESSMENT CRITERION FOR OPTIMUM DESIGN SOLUTIONS OF PIECEWISE CONSTANT SECTIONS IN RODS OF I-SHAPED CROSS-SECTION WITH STABILITY OR FIRST EIGEN-FREQUENCY LIMITS

Specific properties of optimum systems have been already considered in previous research. Moreover, the criteria were proposed for a correct assessment of proximity of optimum to minimum material consumption. In particular, the criteria are proposed for rods of rectangular cross-section with stability or first eigen-frequency limits. These criteria can be used for problem optimization, when the rod cross-sections continuously change longitudinally. The obtained optimum solutions can be considered as a perfect limited object. This optimum project function allows researcher to assess the real design solution using the proximity limit criterion (for example, material consumption limit). This kind of optimum design can also be used as a guideline for real design in terms of a stage-by-stage process of transition from a perfect to real object. In this case, it is possible to assess changes in the object optimality at each stage as compared to the initial and idealized solutions. In particular, one of the variants of the process includes replacing the rod with continuous longitudinally varying cross-sections by a rod with piecewise constant sections. The section boundaries can be based on a perfect object, and cross-sections can be determined by one of the optimization methods. This paper presents criteria, which ensure the reliable definition of the time of completion of the optimization process.

Keywords: criterion; optimization; specific properties; stability; frequency; critical force; buckling; eigen-frequency; reduced stresses.

For citation: Lyakyjvich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Kriterij ocenki optimal'nyh reshenij pri formirovanii kusochno-postoyannyh uchastkov sterzhnej dvutavrovogo poperechnogo secheniya pri ogranicheniah po ustojchivosti ili velichiny pervoj chastoty sobstvnykh kolebanij [Assessment criterion for optimum design solutions of piecewise constant sections in rods of I-shaped cross-section with stability or first eigen-frequency limits]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 92–105.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-92-105

В работах по минимизации веса конструкций [1–7], в частности стержней при различных ограничениях, начиная с публикаций Лагранжа [8], Т. Клаузена [9], Е.Л. Николаи [10] и других, формулировались особые свойства оптимальных конструкций [11, 12]. Так, в работе [13] были сформулированы критерии, позволяющие оценивать близость решений по оптимизации стержней прямоугольного поперечного сечения к минимально материалоемкому проекту при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний. Полученные критерии применимы для случая, когда параметры сечений изменяются непрерывно по длине стержня. Несмотря на то что такой оптимальный проект в подавляющем большинстве случаев в прямом виде не реализуется, он, являясь предельным, например, по минимальной материалоемкости, позволяет оценивать принятое конструкторское решение. Кроме того, предельный проект может использоваться как началь-

ная стадия процесса поэтапного движения от идеального объекта к технологически приемлемому проектному решению [13, 14]. В частности, такой процесс может состоять в замене непрерывного изменения размеров поперечных сечений стержня по его длине на кусочно-постоянное. Для этого по длине стержня намечаются участки, в каждом из которых размеры поперечных сечений не меняются. Выбор границ таких участков определяется как технологическими требованиями, так и стремлением приблизиться к минимально материалоёмкому решению. После выбора границ участков размеры поперечных сечений определяются на каждом участке одним из методов оптимизации.

В большинстве методов оптимизации за критерий завершения процесса принимается состояние, при котором на очередном шаге соответствующего поиска изменение функции цели оказывается меньше некоторой заранее выбранной малой величины. Однако известны случаи, когда при малом изменении на соседних шагах функции цели координаты точки оптимума заметно изменяются. Очевидно, что наличие критерия, более объективно оценивающего близость решения к оптимуму, повысит уверенность в полученном результате. Такие критерии были сформулированы в работе [13] для оптимизации стержней прямоугольного поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний, когда параметры сечений изменяются непрерывно по длине стержня. Эти критерии позволяют оценивать близость полученного решения к минимально материалоёмкому проекту. В настоящей статье предлагаются аналогичные критерии для некоторых случаев проектирования полок стержней [15–19] наименьшего веса с двутавровыми кусочно-постоянно изменяющимися по длине стержня поперечными сечениями (рис. 1, *а*, *б*) при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний.

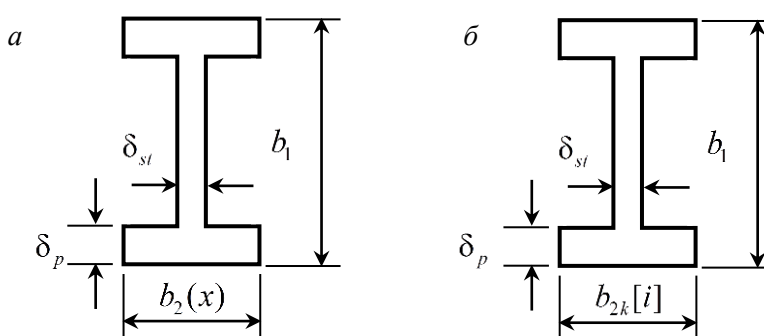


Рис. 1. Сечение рассматриваемого стержня

Пусть не варьируются высота сечения b_1 , толщина полки δ_p и толщина стенки δ_{st} , а варьируются только размеры ширины полки $b_{2k}[i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) при кусочно-постоянном изменении. Собственные колебания происходят в одной главной плоскости инерции.

Критерий, позволяющий оценивать результаты решений об оптимизации ширины полки при ограничениях по устойчивости или величины первой

частоты собственных колебаний для случая, когда ширина полки изменяется непрерывно по длине стержня, сформулирован в работе [13]. Этот критерий может быть представлен в виде трёх вариантов:

$$\sigma_{1\omega}^2(x)b_1 - \sigma_{1\omega t}^2(x)(b_1 - 2 \cdot \delta_p) - 3 \cdot E(\omega_0 \cdot k_\omega)^2 \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_\omega^2 = \text{const}; \quad (1)$$

$$\sigma_{1\omega}^2(x) \frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - \sigma_{1\omega t}^2(x) \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - 1 \right) - 3 \cdot E(\omega_0 \cdot k_\omega)^2 v_\omega^2 \cdot \rho = \text{const}; \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{1\omega t}(x) = \sqrt{\sigma_{1\omega}^2(x) \frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - \sigma_{1\omega t}^2(x) \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - 1 \right) - 3 \cdot E(\omega_0 \cdot k_\omega)^2 v_\omega^2 \cdot \rho} = \text{const}, \quad (3)$$

где $\sigma_{1\omega}(x)$ и $\sigma_{1\omega t}$ – соответственно нормальные напряжения в крайних волокнах двутаврового сечения и в волокнах на границе стенки и полки.

Вариант (3) введен лишь для того, чтобы подчеркнуть его связь с ранее сформулированными критериями. Использование этого варианта критериев при ограничениях на величину низшей частоты собственных колебаний для оценки процесса на начальных стадиях оптимизации может привести к отрицательным значениям подкоренных выражений. Поэтому для избегания сбоев вычислительного процесса вариант (3) не следует использовать.

Сформулируем критерий, позволяющий оценивать результаты решений об оптимизации ширины полки при ограничениях по устойчивости или величины первой частоты собственных колебаний при кусочно-постоянном изменении размеров.

Запишем функцию цели в виде

$$V_0 = \sum_1^n F[i] \cdot l_u[i], \quad \text{где} \quad F[i] = 2 \cdot b_2 k[i] \delta_p + b_1 \cdot \delta_{st} - 2 \cdot \delta_p \cdot \delta_{st}.$$

Но, так как варьируются только значения $b_{2k}[i]$, примем

$$V_0 = \sum_1^n 2 \cdot b_{2k}[i] \delta_p \cdot l_u[i]. \quad (4)$$

Ограничения на величину низшей частоты собственных колебаний

$$\omega_0 \leq \omega[1]. \quad (5)$$

Для выявления критерия достижения функцией цели минимума при ограничении на величину низшей частоты собственных колебаний используем метод поиска условного экстремума.

Сформируем интеграл, условия экстремума которого должны обеспечить как минимум функции цели (4), так и выполнение условий, что заданная частота будет низшей собственной в главной плоскости инерции, то есть

$$\omega_0 = \omega[1]. \quad (6)$$

Как уже отмечалось, при выполнении (6) в виде равенства должно иметь место условие

$$\Theta_{\omega 1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{E I_1[i] (v_\omega'')^2 - P[i] (v_\omega')^2 - (\omega[1])^2 [m(x) + \rho \cdot F[i] v_\omega^2] dx = 0. \quad (7)$$

Момент инерции сечения записывается в виде

$$I_1[i] = \frac{b_{2k}[i]}{12} [b_1^3 - (b_1 - 2 \cdot \delta_p)^3] + \frac{\delta_{st}}{12} (b_1 - 2 \cdot \delta_p)^3. \quad (8)$$

Выражение, экстремум которого обеспечит минимум функции

$$V_0 = \sum_{i=1}^n 2 \cdot b_{2k}[i] \delta_p \cdot l_u[i] \quad (9)$$

и выполнение условий, запишется в виде

$$\Theta_{\omega 1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{EI_1[i](v''_{\omega})^2 - P[i](v'_{\omega})^2 - (\omega[1])^2 [m(x) + \rho \cdot F[i]v_{\omega}^2] dx = 0; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_{0\omega} = & \sum_{i=1}^n 2 \cdot b_{2k}[i] \delta_p \cdot l_u[i] - \sum_{i=1}^n \int_{x[i-1]}^{x[i]} \lambda_{\omega 1} \{E[\frac{b_{2k}[i]}{12} (b_1^3 - (b_1 - 2 \cdot \delta_p)^3) + \\ & + \frac{\delta_{st}}{12} (b_1 - 2 \cdot \delta_p)^3] (v''_{\omega})^2 - P[1] (v'_{\omega})^2 - \\ & - (\omega_0)^2 [m(x) + \rho(2 \cdot b_{2k}[i] \delta_p + b_1 \cdot \delta_{st} - 2 \cdot \delta_p \cdot \delta_{st})] v_{\omega}^2\} dx. \end{aligned} \quad (11)$$

Очевидно, что вариации выражения $V_{0\omega}$ (11) по $\lambda_{\omega 1}$ приведут к выполнению условия (10).

Для отыскания минимума выражения (11) при поставленных условиях (6), (10) запишем систему уравнений

$$\frac{\partial V_{0\omega}}{\partial b_{1k}[i]} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Запишем i -е уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{0\omega}}{\partial b_{1k}[i]} = & 2 \cdot \delta_p \cdot l_u[i] - \\ & - \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \lambda_{\omega 1} \{ \frac{E}{12} [b_1^3 - (b_1 - 2 \cdot \delta_p)^3] (v''_{\omega})^2 - (\omega_0)^2 \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_{\omega}^2 \} \} dx = 0 \end{aligned}$$

или

$$\int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \frac{E}{12} [b_1^3 - (b_1 - 2 \cdot \delta_p)^3] (v''_{\omega})^2 - (\omega_0)^2 \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_{\omega}^2 \} dx = \frac{2 \cdot \delta_p \cdot l_u[i]}{\lambda_{\omega 1}}.$$

Учитывая, что δ_p и $\lambda_{\omega 1}$ – постоянные величины, можем записать

$$\frac{1}{l_k[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \{ \frac{E}{12} [b_1^3 - (b_1 - 2 \cdot \delta_p)^3] (v''_{\omega})^2 - (\omega_0)^2 \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_{\omega}^2 \} dx = \text{const}. \quad (13)$$

Как известно, нормальные напряжения в стержне при изгибе в волокне, отстоящем от нейтрального слоя на расстоянии y_s , определяются зависимостью $\sigma = (M \cdot y_s) / I$. Так как $M = -EI \cdot v''$, запишем $\sigma = -E \cdot y_s \cdot v''$.

После простых преобразований (13) перепишется в виде

$$\frac{1}{l_k[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left\{ \frac{1}{3 \cdot E} \left[\left(\frac{E \cdot b_1 \cdot v''_{\omega}}{2} \right)^2 b_1 - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{b_1 - 2 \cdot \delta_p}{2} E \cdot v''_{\omega} \right)^2 (b_1 - 2 \cdot \delta_p) \right] - (\omega_0)^2 \cdot \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_{\omega}^2 \right\} dx = \text{const.} \quad (14)$$

Заметим, что

$$\left(\frac{E \cdot b_1 \cdot v''_{\omega}}{2} \right)^2 = \sigma_{1\omega}^2(x); \quad \left(\frac{b_1 - 2 \cdot \delta_p}{2} E \cdot v''_{\omega} \right)^2 = \sigma_{1\omega t}^2(x)$$

соответственно квадрат нормального напряжения в крайних волокнах двутаврового сечения и в волокнах на границе стенки и полки.

Теперь (14) запишется в виде

$$\frac{1}{l_k[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{1\omega}^2(x) b_1 - \sigma_{1\omega t}^2(x) (b_1 - 2 \cdot \delta_p) - 3 \cdot E (\omega_0)^2 \cdot \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_{\omega}^2] dx = \text{const} \quad (15)$$

или

$$\frac{1}{l_k[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{1\omega}^2(x) \frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - \sigma_{1\omega t}^2(x) \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - 1 \right) - 3 \cdot E (\omega_0)^2 v_{\omega}^2(x) \cdot \rho \right] dx = \text{const.} \quad (16)$$

Перепишем зависимости (15) и (16) в виде

$$S_1[i] = \frac{1}{l_k[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} [\sigma_{1\omega}^2(x) b_1 - \sigma_{1\omega t}^2(x) (b_1 - 2 \cdot \delta_p) - \\ - 3 \cdot E (\omega_0)^2 \rho \cdot 2 \cdot \delta_p \cdot v_{\omega}^2] dx = \text{const}; \quad (17)$$

$$S_2[i] = \frac{1}{l_k[i]} \int_{x[i-1]}^{x[i]} \left[\sigma_{1\omega}^2(x) \frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - \sigma_{1\omega t}^2(x) \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_p} - 1 \right) - \right. \\ \left. - 3 \cdot E (\omega_0)^2 v_{\omega}^2(x) \rho \right] dx = \text{const.} \quad (18)$$

Как отмечалось выше, сформулированные критерии могут использоваться и тогда, когда вводится только ограничение по устойчивости. В этом случае в выражениях критериев значение собственной частоты полагается нулевым. Сравнение критериев (17), (18), полученных при кусочно-постоянном изменении ширины полки, с аналогичными критериями при непрерывном её изменении (1), (2) и (3) показывает, что под интегралами в (17) и (18) стоят соответственно выражения (1) и (2). Критерии $S_1[i]$ и $S_2[i]$ содержат множитель $1/l_k[i]$. Поэтому критерии (17) и (18) могут рассматриваться на каждом кусочно-постоянном участке как среднее значение соответственно критериев (1) и (2) на единицу длины участка. Для иллюстрации возможностей полученного критерия приведем примеры.

Пример 1. Приведем пример использования критерия (17) для случая, когда вводятся ограничения по устойчивости.

Рассмотрим прямолинейный шарнирно опертый стержень двутаврового сечения пролётом $l = 6$ м, нагруженный продольной силой $P = 9000000$ Н (рис. 2, а). Модуль упругости материала стержня $E = 206000$ МПа [15, 20]. Высота сечения двутавра $b_1 = 0,29$ м, толщина стенки $\delta_{st} = 0,009$ м, полки $\delta_p = 0,014$ м.

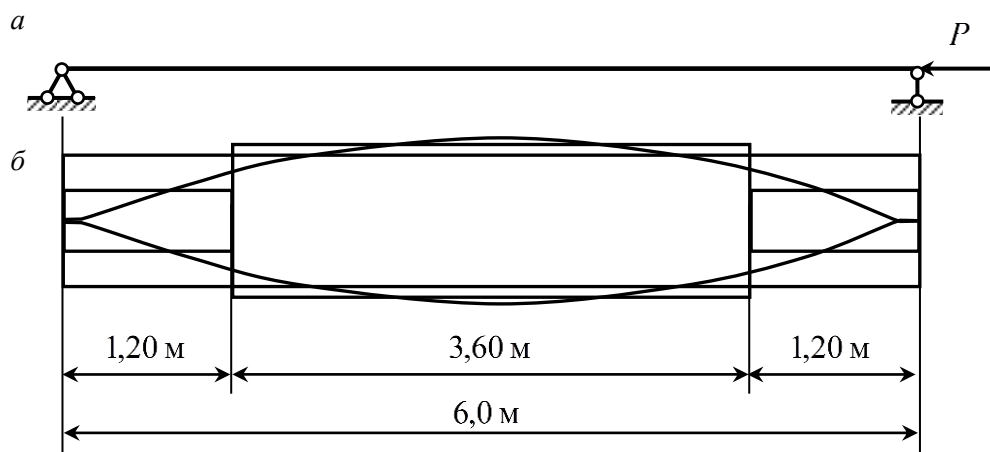


Рис. 2. К примеру 1

Требуется определить очертание полки двутавра таким образом, чтобы критическая сила была бы не больше действующей, а объём материала полки был бы минимальным.

Ограничение по устойчивости запишем в виде

$$P = P_{кр}, \quad (19)$$

а функцию цели в виде (4). Оптимизацию [8–14, 20, 21] проведём методом случайного поиска на основе дискретной модели из 25 участков.

Рассмотрим три варианта. За исходный вариант принята полка постоянного по длине сечения. Значения ее размеров определены при первом выходе на границу области допустимых решений. Они оказались равными $b_2^0[i] = 0,2737$ м. При этом функция цели равна $V_0 = 0,0460$ м³. Результаты этого варианта представлены во втором столбце табл. 1 и на рис. 2, б.

Во втором варианте рассматривается непрерывное изменение размеров ширины полки. За критерий остановки процесса оптимизации здесь принята близость нормированного значения критерия (1) к единице. В сечениях 1 и 25 критерий значительно отличается от единицы, что объясняется достижением шириной полки размера толщины стенки и остановкой в этих сечениях процесса оптимизации. Результаты этого варианта приведены в столбцах 3 и 4 табл. 1 и на рис. 2, б. Функция цели в этом варианте равна $V_0 = 0,0372$ м³, что на 19,20 % меньше, чем у исходного варианта.

Таблица 1

Сведения о вариантах решения примера 1

№ п/п	$b_2^0[i]$, м	$b_2[i]$, м	$\sigma_{10}^2[i]$	$b_{2k}[i]$, м	$\sigma_{10}^2[i]$	$S_1[i]$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,2737	0,009	0,7308	0,1233	0,0153	1,0000
2	0,2737	0,0581	0,9994	0,1233	0,1351	1,0000
3	0,2737	0,1075	1,0000	0,1233	0,3596	1,0000
4	0,2737	0,1524	0,9986	0,1233	0,6605	1,0000
5	0,2737	0,1926	0,9976	0,1233	1,0000	1,0000
6	0,2737	0,2277	0,9999	0,3139	0,2564	0,9992
7	0,2737	0,2584	0,9997	0,3139	0,3220	0,9992
8	0,2737	0,2843	0,9994	0,3139	0,3852	0,9992
9	0,2737	0,3057	0,9985	0,3139	0,4426	0,9992
10	0,2737	0,3220	0,9997	0,3139	0,4908	0,9992
11	0,2737	0,3341	0,9976	0,3139	0,5274	0,9992
12	0,2737	0,3412	0,9975	0,3139	0,5501	0,9992
13	0,2737	0,3435	0,9979	0,3139	0,5578	0,9992
14	0,2737	0,3412	0,9975	0,3139	0,5501	0,9992
15	0,2737	0,3341	0,9976	0,3139	0,5274	0,9992
16	0,2737	0,3220	0,9997	0,3139	0,4908	0,9992
17	0,2737	0,3057	0,9985	0,3139	0,4426	0,9992
18	0,2737	0,2843	0,9994	0,3139	0,3852	0,9992
19	0,2737	0,2584	0,9997	0,3139	0,3220	0,9992
20	0,2737	0,2277	0,9999	0,3139	0,2564	0,9992
21	0,2737	0,1926	0,9976	0,1233	1,0000	1,0000
22	0,2737	0,1524	0,9986	0,1233	0,6605	1,0000
23	0,2737	0,1075	1,0000	0,1233	0,3596	1,0000
24	0,2737	0,0581	0,9994	0,1233	0,1351	1,0000
25	0,2737	0,009	0,7308	0,1233	0,0153	1,0000
V_0 , м ³	0,0460	0,0372	–	0,0399	–	–
%	0	19,20	–	13,18	–	–

В третьем варианте рассматривается кусочно-постоянное изменение ширины полки. Как отмечалось выше, выбор границ участков, на которых размеры не изменяются, определяется как технологическими требованиями, так и стремлением максимально приблизиться к минимально материалоёмкому решению, в данном примере к решению по второму варианту. Предположим, что технологические требования допускают проектирование стержня из трёх участков. Так как целью примера является иллюстрация критерия (17), то, учитывая ограничение объёма статьи, рассмотрим только один вариант выбора границ участков (рис. 2).

Результаты оптимизации этого варианта приведены в столбцах 5, 6, 7 табл. 1 и на рис. 2, б. Величины критерия (17) (столбец 7 табл. 1) во всех сечениях близки к единице, что позволяет остановить процесс оптимизации. Функция цели в этом варианте равна $V_0 = 0,0399 \text{ м}^3$, что на 13,18 % меньше, чем у исходного варианта.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий применение критериев для многопролётных стержней.

Пример 2. Рассматривается двухпролётный стержень двутаврового сечения, нагруженный продольной силой $P = 5000000 \text{ Н}$ и несущий распределённую массу $m(x) = 200 \text{ кг/м}$ (рис. 3, а). Модуль упругости материала стержня $E = 206000 \text{ МПа}$, удельная масса $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$. Высота сечения двутавра $b_1 = 0,29 \text{ м}$, толщина стенки $\delta_{st} = 0,009 \text{ м}$, полки $\delta_p = 0,014 \text{ м}$.

Требуется определить очертание полки двутавра таким образом, чтобы первая частота собственных колебаний была бы не больше заданного значения $\omega_0 = 90 \text{ с}^{-1}$, а объём материала полки был бы минимальным. Оптимизацию проведём методом случайного поиска на основе дискретной модели из 40 участков.

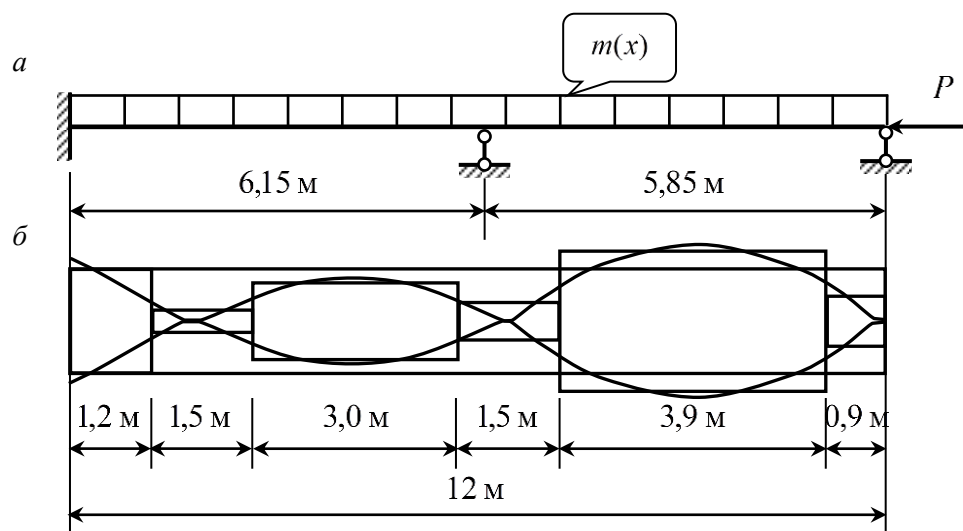


Рис. 3. К примеру 2

Рассмотрим три варианта. За исходный вариант принята полка постоянного по длине сечения. Значения её размеров определены при первом выходе на границу области допустимых решений. Они оказались равными $b_2^0[i] = 0,2934 \text{ м}$. При этом функция цели равна $V_0 = 0,0986 \text{ м}^3$. Результаты этого варианта представлены во втором столбце табл. 2 и на рис. 3, б.

Во втором варианте рассматривается непрерывное изменение размеров ширины полки. За критерий остановки процесса оптимизации здесь принята близость нормированного значения критерия (1) к единице. В сечениях 7 и 22

критерий значительно отличается от единицы, что объясняется достижением шириной полки размера, близкого к толщине стенки, и остановкой в этих сечениях процесса оптимизации. Результаты этого варианта приведены в столбцах 3 и 4 табл. 2 и на рис. 3, б. Функция цели в этом варианте равна $V_0 = 0,0758 \text{ м}^3$, что на 23,10 % меньше, чем у исходного варианта.

Таблица 2

Сведения о вариантах решения примера 2

№ п/п	$b_1^0[i], \text{ м}$	$b_1[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$b_{1k}[i], \text{ м}$	$\sigma_{10}^2[i]$	$S_1[i]$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,2934	0,3400	0,9962	0,2772	0,6888	0,9994
2	0,2934	0,2842	0,9961	0,2772	0,4922	0,9994
3	0,2934	0,2243	0,9974	0,2772	0,3177	0,9994
4	0,2934	0,1610	0,9948	0,2772	0,1743	0,9994
5	0,2934	0,0939	0,9982	0,0706	0,7387	0,9994
6	0,2934	0,0254	0,9766	0,0706	0,1250	0,9994
7	0,2934	0,0099	0,2779	0,0706	-0,0121	0,9994
8	0,2934	0,0574	1,0000	0,0706	0,2994	0,9994
9	0,2934	0,1116	0,9900	0,0706	0,9401	0,9994
10	0,2934	0,1556	0,9955	0,2199	0,2063	0,9997
11	0,2934	0,1906	0,9971	0,2199	0,3243	0,9997
12	0,2934	0,2168	0,9976	0,2199	0,4317	0,9997
13	0,2934	0,2350	0,9930	0,2199	0,5129	0,9997
14	0,2934	0,2439	0,9950	0,2199	0,5574	0,9997
15	0,2934	0,2451	0,9914	0,2199	0,5605	0,9997
16	0,2934	0,2370	0,9954	0,2199	0,5232	0,9997
17	0,2934	0,2206	0,9963	0,2199	0,4523	0,9997
18	0,2934	0,1958	0,9960	0,2199	0,3589	0,9997
19	0,2934	0,1625	0,9945	0,2199	0,2561	0,9997
20	0,2934	0,1206	0,9986	0,1046	0,5722	0,9989
21	0,2934	0,0722	0,9970	0,1046	0,2569	0,9989
22	0,2934	0,009	0,0091	0,1046	-0,0045	0,9989
23	0,2934	0,0778	0,9993	0,1046	0,2657	0,9989
24	0,2934	0,1657	0,9938	0,1046	1,0000	0,9989
25	0,2934	0,2407	0,9946	0,3908	0,1419	0,9998
26	0,2934	0,3030	0,9947	0,3908	0,2415	0,9998
27	0,2934	0,3528	0,9972	0,3908	0,3473	0,9998
28	0,2934	0,3916	0,9955	0,3908	0,4472	0,9998
29	0,2934	0,4192	0,9959	0,3908	0,5300	0,9998
30	0,2934	0,4364	0,9962	0,3908	0,5868	0,9998

Окончание табл. 2

№ п/п	$b_1^0[i]$, м	$b_1[i]$, м	$\sigma_{10}^2[i]$	$b_{1k}[i]$, м	$\sigma_{10}^2[i]$	$S_1[i]$
1	2	3	4	5	6	7
31	0,2934	0,4436	0,9962	0,3908	0,6115	0,9998
32	0,2934	0,4410	0,9962	0,3908	0,6017	0,9998
33	0,2934	0,4281	0,9974	0,3908	0,5588	0,9998
34	0,2934	0,4057	0,9943	0,3908	0,4876	0,9998
35	0,2934	0,3714	0,9967	0,3908	0,3961	0,9998
36	0,2934	0,3264	0,9945	0,3908	0,2946	0,9998
37	0,2934	0,2686	0,9960	0,3908	0,1942	0,9998
38	0,2934	0,1987	0,9944	0,1365	0,8821	1,0000
39	0,2934	0,1163	0,9988	0,1365	0,3351	1,0000
40	0,2934	0,0250	0,9633	0,1365	0,0382	1,0000
V_0 , м ³	0,0986	0,0758	–	0,0813	–	–
%	0	23,10	–	17,57	–	–

В третьем варианте рассматривается кусочно-постоянное изменение ширины полки. Как отмечалось выше, выбор границ участков, на которых размеры не изменяются, определяется как технологическими требованиями, так и стремлением максимально приблизиться к минимально материалоемкому решению. Учитывая ограничение объема статьи, рассмотрим только один вариант выбора границ участков (рис. 3).

Результаты оптимизации этого варианта приведены в столбцах 5, 6, 7 табл. 2 и на рис. 3, б. Величины критерия (17) (столбец 7 табл. 2) во всех сечениях близки к единице, что позволяет остановить процесс оптимизации. Функция цели в этом варианте равна $V_0 = 0,0813 \text{ м}^3$, что на 17,57 % меньше, чем у исходного варианта.

При оптимизации стержней с двутавровым поперечным сечением при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний, когда поперечные сечения непрерывно изменяются по его длине, были сформулированы критерии, оценивающие близость полученных решений к минимально материалоемкому [13]. Однако такие проекты в большинстве случаев в непосредственном варианте не реализуются. В то же время они позволяют оценивать реальное конструкторское решение по критерию его близости к предельному (например, по материалоемкости), а также использоваться как ориентир при реальном проектировании. Один из вариантов перехода от предельного проекта к реально приемлемому состоит в замене непрерывного изменения размеров поперечных сечений кусочно-постоянными участками. Границы участков могут выбираться на основе идеального объекта, а размеры поперечных сечений определяться одним из методов оптимизации.

В настоящей статье предлагаются критерии, позволяющие надёжно оценивать момент окончания процесса такой оптимизации.

Теоретические результаты статьи в англоязычном варианте представлены в работе [22], а примеры в работе [23].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Boslovyak P.V., Emelyanova G.A.* Optimization Mathematical Modeling of the Weight of Metal Structure of Suspended Belt Conveyor Linear Section // IFAC-PapersOnLine. 2018. V. 51. I. 30. P. 616–619.
2. *Hansel W., Treptow A., Becker W., Freisleben B.* A heuristic and a genetic topology optimization algorithm for weight-minimal laminate structures // Composite Structures. 2002. V. 58. I. 2. P. 287–294.
3. *Jonsson B., Barsoum Z., Sperle J.-O.* Weight optimization and fatigue design of a welded bogie beam structure in a construction equipment // Engineering Failure Analysis. 2012. V. 19. P. 63–76.
4. *Navarrina F., Muinos I., Colominas I., Casteleiro M.* Topology optimization of structures: A minimum weight approach with stress constraints // Advances in Engineering Software. 2005. V. 36. I. 9. P. 599–606.
5. *Park C.H., Saouab A., Breard J., Han W.S., Vautrin A., Lee W.I.* An integrated optimisation for the weight, the structural performance and the cost of composite structures // Composites Science and Technology. 2009. V. 69. I. 7–8. P. 1101–1107.
6. *Praveen V., Dayan G.M., Kumar A.S.* A multi-objective design optimization technique for weight and cost minimization of hybrid laminated composite structure by modified non-dominated sorting genetic algorithm // Materials Today: Proceedings. 2018. V. 5. I. 12. Part 1. P. 25798–25806.
7. *Winklberger M., Heftberger P., Sattlecker M., Schagerl M.* Fatigue strength and weight optimization of threaded connections in tie-rods for aircraft structures // Procedia Engineering. 2018. V. 213. P. 374–382.
8. *Lagrange J.-L.* Sur la figure des colonnes // Mescellanea Taurinensia. 1770–1773. V. 5, P. 123.
9. *Clausen T.* Über die form architektonischer Säulen // Bull. cl. physico-math. Acad. St.-Petersburg. 1851. V. 9. P. 371–380.
10. *Николаи Е.Л.* Задача Лагранжа о наивыгоднейшем очертании колонны // Известия Санкт-Петербургского политехнического института. 1907. № 8.
11. *Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А.* О задачах поиска минимума и максимума в строительной механике // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. V. 13. I. 2. P. 103–124.
12. *Lyakhovich L.S., Malinovsky A.P., Tukhfatullin B.A.* Criteria for Optimal Strengthening of Bar Flange with I-type Cross-section with Stability Constraints on the Value of the First Natural Frequency // Procedia Engineering. 2016. V. 153. P. 427–433.
13. *Ляхович Л.С.* Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Издательство Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2009. 372 с.
14. *Ляхович Л.С., Перельмутер А.В.* Некоторые вопросы оптимального проектирования строительных конструкций // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. V. 10. I. 2. P. 14–23.
15. *Aslami M., Akimov P.A.* Analytical solution for beams with multipoint boundary conditions on two-parameter elastic foundations // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. V. 16. I. 4. P. 668–677.
16. *Khasawneh F.A., Segalman D.* Exact and numerically stable expressions for Euler-Bernoulli and Timoshenko beam modes // Applied Acoustics. 2019. V. 151. P. 215–228.
17. *Peradze J.* On the approximate solution of a Kirchhoff type static beam equation // Transactions of A. Razmadze Mathematical Institute. 2016. V. 170. I. 2. P. 266–271.
18. *Realı A., Gomez H.* An isogeometric collocation approach for Bernoulli–Euler beams and Kirchhoff plates // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2015. V. 284. P. 623–636.

19. Wang D., Liu W., Zhang H. Superconvergent isogeometric free vibration analysis of Euler – Bernoulli beams and Kirchhoff plates with new higher order mass matrices // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. V. 286. P. 230–267.
20. Ludeker J.K., Kriegesmann B. Fail-safe optimization of beam structures // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2019. V. 6. I. 3. P. 260–268.
21. Quinteiro G.F. Beam optimization: improving methodology // *Annals of Nuclear Energy*. 2004. V. 31. I. 4. P. 399–411.
22. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 1: theoretical foundations // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. P. 88–100.
23. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 2: numerical examples // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. I. 4. P. 101–110.

REFERENCES

1. Boslovyak P.V., Emelyanova G.A. Optimization mathematical modeling of the weight of metal structure of suspended belt conveyor linear section. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. V. 51. No. 30. Pp. 616–619.
2. Hansel W., Treptow A., Becker W., Freisleben B. A heuristic and a genetic topology optimization algorithm for weight-minimal laminate structures. *Composite Structures*. 2002. V. 58. No. 2. Pp. 287–294.
3. Jonsson B., Barsoum Z., Sperle J.-O. Weight optimization and fatigue design of a welded bogie beam structure in a construction equipment. *Engineering Failure Analysis*. 2012. V. 19. Pp. 63–76.
4. Navarrina F., Muinos I., Colominas I., Casteleiro M. Topology optimization of structures: A minimum weight approach with stress constraints. *Advances in Engineering Software*. 2005. V. 36. No. 9. Pp. 599–606.
5. Park C.H., Saouab A., Breard J., Han W.S., Vautrin A., Lee W.I. An integrated optimisation for the weight, the structural performance and the cost of composite structures. *Composites Science and Technology*. 2009. V. 69. No. 7–8. Pp. 1101–1107.
6. Praveen V., Dayan G.M., Kumar A.S. A multi-objective design optimization technique for weight and cost minimization of hybrid laminated composite structure by modified non-dominated sorting genetic algorithm. *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5. No. 12. Pp. 25798–25806.
7. Winklberger M., Heftberger P., Sattler M., Schagerl M. Fatigue strength and weight optimization of threaded connections in tie-rods for aircraft structures. *Procedia Engineering*. 2018. V. 213. Pp. 374–382.
8. Lagrange J.-L. Sur la figure des colonnes. *Mesclane Taurinensia*. 1770-1773. V. 5, P. 123.
9. Clausen T. Über die form architektonischer Säulen. *Bull. cl. physico-math. Acad. St.-Petersburg*. 1851. V. 9. Pp. 371–380.
10. Nikolai E.L. Zadacha Lagranzha o naivygodneishem ochertanii kolonny [The Lagrange problem of the best shape of the column]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo instituta*. 1907. No. 8. (rus)
11. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. O zadachakh poiska minimuma i maksimuma v stroitel'noi mekhanike [About hill-climbing problems in structural mechanics]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. V. 13. No. 2. Pp. 103–124. (rus)
12. Lyakhovich L.S., Malinovsky A.P., Tukhfatullin B.A. Criteria for optimal strengthening of bar flange with I-type cross-section with stability constraints on the value of the first natural frequency. *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. Pp. 427–433.
13. Lyakhovich L.S. Osobyie svoystva optimal'nykh sistem i osnovnye napravleniya ikh realizatsii v metodakh rascheta sooruzhenii [Specific properties of optimum systems using methods of structural analysis]. Tomsk: TSUAB, 2009. 372 p. (rus)

14. Lyakhovich L.S., Perelmuter A.V. Nekotorye voprosy optimal'nogo proektirovaniya stroitel'nykh konstruktov [Optimum building design]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014. V. 10. No. 2. Pp. 14–23. (rus)
15. Aslami M., Akimov P.A. Analytical solution for beams with multipoint boundary conditions on two-parameter elastic foundations. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. V. 16. No. 4. Pp. 668–677.
16. Khasawneh F.A., Segalman D. Exact and numerically stable expressions for Euler-Bernoulli and Timoshenko beam modes. *Applied Acoustics*. 2019. V. 151. Pp. 215–228.
17. Peradze J. On the approximate solution of a Kirchhoff type static beam equation. *Transactions of A. Razmadze Mathematical Institute*. 2016. V. 170. No. 2. Pp. 266–271.
18. Reali A., Gomez H. An isogeometric collocation approach for Bernoulli–Euler beams and Kirchhoff plates. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. V. 284. Pp. 623–636.
19. Wang D., Liu W., Zhang H. Superconvergent isogeometric free vibration analysis of Euler–Bernoulli beams and Kirchhoff plates with new higher order mass matrices. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. V. 286. Pp. 230–267.
20. Ludeker J.K., Kriegesmann B. Fail-safe optimization of beam structures. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2019. V. 6. No. 3. Pp. 260–268.
21. Quinteiro G.F. Beam optimization: improving methodology. *Annals of Nuclear Energy*. 2004. V. 31. No. 4. Pp. 399–411.
22. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 1: theoretical foundations. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. No. 4. Pp. 88–100.
23. Lyakhovich L.S., P.A. Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Optimal solutions for creation of rods with piecewise constant cross-sections with stability constraints or constraints for value of the first natural frequency. Part 2: Numerical examples. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. V. 15. No. 4. Pp. 101–110.

Сведения об авторах

Ляхович Леонид Семенович, докт. техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lls@tsuab.ru

Акимов Павел Алексеевич, докт. техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; главный ученый секретарь президиума Российской академии архитектуры и строительных наук, 107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, 24, стр. 1, akimov@raasn.ru

Тухфатуллин Борис Ахатович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, bat9203@gmail.com

Authors Details

Leonid S. Lyakhovich, DSc, Professor, Academy Fellow of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Department of Structural Mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lls@tsuab.ru

Pavel A. Akimov, DSc, Professor, Chief Academic Secretary, Academy Fellow of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Department of Structural Mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building; 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, akimov@raasn.ru

Boris A. Tukhfatullin, PhD, A/Professor, Department of Structural Mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, bat9203@gmail.com

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.31

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-106-117

*Л.А. АНИКАНОВА, А.И. КУРМАНГАЛИЕВА,
О.В. ВОЛКОВА, Д.М. ПЕРВУШИНА,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ГАЗОГИПСОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты исследований поризованных гипсовых строительных материалов, обладающих теплоизоляционными свойствами, которые могут найти применение в строительстве малоэтажных зданий при изготовлении межквартирных и межкомнатных перегородок.

В качестве газообразующего компонента гипсовой матрицы, состоящей из строительного гипса и замедлителя схватывания в виде лимонной кислоты, использован кислый фторангидрит Сибирского химического комбината совместно с карбонатом кальция. Для регулирования подвижности растворной смеси в состав введены суперпластификаторы «Штайнберг МР-4» и «Штайнберг PR-1S(A)», исследовано их влияние на свойства поризованной гипсовой смеси и газогипсовых материалов.

Анализ результатов по влиянию суперпластификаторов на свойства образцов показал, что количество пластификаторов «Штайнберг МР-4» и «Штайнберг PR-1S(A)» 2 % от массы строительного гипса является оптимальным для достижения прочности образцов до 27 МПа («Штайнберг МР-4») и низкой плотности («Штайнберг PR-1S(A)»). При этом обеспечивается высокая подвижность поризованной смеси. Основная роль суперпластификаторов в гипсовой водозатворенной композиции заключается в увеличении ξ -потенциала материала и снижении за счет этого водогипсового отношения смеси при сохранении подвижности. Эффект действия суперпластификаторов в значительной мере зависит от исходной модификации вяжущего, его дисперсности и подвижности.

Ключевые слова: фторангидрит; поризованные материалы; суперпластификаторы; прочность; плотность; подвижность смеси.

Для цитирования: Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Волкова О.В., Первушина Д.М. Влияние пластифицирующих добавок на свойства газогипсовых материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 106–117.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-106-117

L.A. ANIKANOVA, A.I. KURMANGALIEVA,
O.V. VOLKOVA, D.M. PERVUSHINA,
Tomsk State University Of Architecture And Building

GAS-GYPSUM MATERIALS PROPERTIES MODIFIED BY PLASTICIZING AGENTS

The paper deals with porous gypsum building materials having heat-insulating properties and applied in low-rise building construction, in the manufacture of flat and room dividers.

Anhydrite of the Siberian Chemical Combine together with sodium carbonate is used as a gas-forming component. To regulate the plasticity of the mortar mixture, the Steinberg MP-4 and Steinberg PR-1S(A) superplasticizers are introduced into the composition, and their effect on the porous gypsum mixture properties is studied.

The analysis of the superplasticizer influence on the properties shows that the use of the Steinberg MP-4 with the amount of 2 wt.% of gypsum is optimum to achieve high strength of up to 27 MPa, while providing high mobility of the porous mixture. The main role of superplasticizers in a gypsum water-soluble composition is to increase the ξ -potential of the material and to reduce the water-gypsum ratio of the mixture while maintaining its mobility. The effect of superplasticizers largely depends on the initial modification of the binder, its dispersibility and mobility.

Keywords: anhydrite; porous materials; superplasticizer; compressive strength; density; mixture mobility.

For citation: Anikanova L.A., Kurmangalieva A.I., Volkova O.V., Pervushina D.M. Issledovanie vliyaniya plastifitsiruyushchikh dobavok na svoystva gazogipsovykh materialov [Gas-gypsum materials properties modified by plasticizing agents]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 106–117. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-106-117

Введение

Для реализации стратегических задач строительной отрасли Российской Федерации по ресурсо- и энергосбережению необходимо обеспечивать поиск инновационных технологических приемов и обосновывать вероятность повышения конкурентной способности материалов для теплозащиты ограждающих конструкций. В настоящее время актуальными являются энергоэффективные экологически безвредные теплоизоляционные материалы на основе гипсовых и гипсосодержащих исходных компонентов, свойства которых находятся в зависимости от ведущих методик снижения средней плотности строительного гипса. Материалы на основе гипсовых вяжущих обладают прекрасными эксплуатационными характеристиками: высокой прочностью, огнестойкостью, хорошими тепло- и звукоизолирующими свойствами и водостойкостью. Гипсовые материалы удачно сочетают в себе качество сырья и требовательный подход к потребительским свойствам готовой продукции. Строительный гипс не имеет запаха и экологичен. Он быстро набирает прочность, имеет хорошую адгезию к другим строительным материалам, легко принимает форму материалов, контактирующих с ним [1–3].

Основными методами снижения средней плотности гипсовых материалов являются: использование пористых заполнителей, применение газо- и пенообразующих добавок. На данный момент применение таких добавок недостаточно

действенно, что связано с быстрыми сроками схватывания строительного гипса, высокой стоимостью добавок, поэтому актуальными являются методы, основанные на использовании таких добавок, которые выделяют газ при протекании химических реакций. Применение такого способа не является новым, однако подходы к выбору газообразующих добавок, исходной матрицы и технологических процессов производства поризованных материалов существенно различаются [4]. Авторы предлагают в качестве порообразующей добавки использовать вторичное гипсовое сырье с адсорбированной на его зернах серной кислоты и карбонатной муки. Задача утилизации техногенных отходов относится к категории глобальных системных проблем современной науки и технологии. Практический аспект эффективного решения данной проблемы соотносится с формированием комплексов безотходных производств в составе региональных промышленных кластеров. Реализация данной концепции зависит от степени изученности техногенных отходов в качестве потенциальных сырьевых компонентов для конструирования и синтеза структур строительных композитов, создания научно обоснованных принципов и технологий структурообразования систем твердения и получения искусственного камня, который должен пройти тестирование, идентификацию и диагностику с точки зрения его функциональных возможностей [5, 6]. При использовании вторичного сырья одновременно решаются две проблемы: экономия природных ресурсов [7] и переработка вредных отходов с применением безотходных технологий, улучшение экологической обстановки [8–10].

Недостатком гипсовых вяжущих при производстве поризованных материалов является быстрое схватывание, при этом не обеспечивается равномерный процесс газовыделения и схватывания, что приводит к образованию неоднородной пористой структуры и ухудшению эксплуатационных характеристик материала. Для регулирования сроков схватывания и газообразования применяются добавки различного назначения. В настоящей работе в качестве компонента газообразующей добавки использован модифицированный фторангидрит Сибирского химического комбината (СХК) совместно с карбонатом кальция, а также суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе – эффективные реологические и водоредуцирующие добавки для различных вяжущих композиций. В качестве замедлителя схватывания гипсового вяжущего использована лимонная кислота. Основные способы модифицирования кислого фторангидрита представлены в исследованиях [11–15], процессы структурообразования гипсовых вяжущих изучены авторами в работах [16–20].

Целью работы является оценка влияния различных поликарбоксилатных пластификаторов на свойства поризованной гипсовой смеси. В качестве исследуемых пластификаторов использовались добавки «Штайнберг МР-4» и «Штайнберг PR-1S(A)». В отличие от традиционно используемых нафталинформальдегидных пластификаторов поликарбоксилатные экологически безопасны, обладают антикоррозионными свойствами, введение их в гипс позволяет значительно увеличить долговечность возводимых объектов.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве вяжущего использован нормально твердеющий гипс средней степени помола марки Г-5 АП (ГОСТ 125–2018). В качестве поризу-

ющего компонента использован кислый фторангидрит Сибирского химического комбината (ТУ 2141-030-07622928–2019) совместно с карбонатом кальция (ГОСТ 32802–2014). Состав и качественные характеристики кислого фторангидрита СХК приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический и гранулометрический состав кислого фторангидрита

Температура фторангидрита на выходе из печи	Химический состав фторангидрита, масс. %					Гранулометрический состав, частные остатки на ситах, %					Истинная плотность $\rho_{\text{пл}}$, кг/м ³	Средняя плотность $\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³
	CaSO_4^{p}	$\text{CaSO}_4^{\text{н}}$	CaF_2	H_2SO_4	HF	2,5–5	1,25–2,5	0,63–1,25	0,315–0,63	0,16–0,315		
180 °С	15	81,3	0,5	3,0	0,2	8,4	11,0	4,2	40,7	35,7	2570	1470

С целью исследования вяжущих свойств фторангидрит естественной гранулометрии высушивался при 45 °С в сушильном шкафу до постоянной массы. Процесс структурообразования фторангидрита естественной гранулометрии оценивался по следующим параметрам: срокам схватывания, прочности при сжатии и степени гидратации. По результатам исследований, представленным в табл. 2, процесс схватывания фторангидрита естественной гранулометрии с различным содержанием остаточной кислоты протекает очень медленно.

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики фторангидрита СХК до стадии нейтрализации

Содержание кислоты, %	Сроки схватывания, ч-мин		Содержание гидратной воды, %		Прочность, МПа
	Начало	Конец	в исходной пробе	28 сут	28 сут
0,15	6–30	12–25	0,93	0,98	1,2
3,0	7–25	14–55	4,8	5,1	1,0
5,5	8–30	15–20	6,4	7,1	0,5

Степень связывания воды через 28 сут составляет 0,05–0,7 %, прочность затвердевшего камня в возрасте 28 сут составляет всего 0,5–1,2 МПа и снижается с увеличением содержания серной кислоты во фторангидрите. Процесс структурообразования, по нашему мнению, осуществляется за счет уплотнения гелеобразных составляющих при удалении (испарении) воды.

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что фторангидрит без дополнительной обработки и химической модификации непригоден в качестве вяжущего для производства строительных изделий из-за его

медленной гидратации и низких прочностных характеристик. В данной работе использован кислый фторангидрит, активированный в дизентеграторе до удельной поверхности $250 \text{ м}^2/\text{кг}$ в качестве «носителя» серной кислоты. Процесс активации использовался для повышения площади контакта между компонентами газообразователя.

В качестве пластификатора использовались суперпластификаторы «Штайнберг» с концентрацией: 1; 1,6; 2; 5; 10 % в пересчете на сухое вещество, которые вводились в гипсовое вяжущее вместе с водой затворения. Технические характеристики суперпластификаторов «Штайнберг МР-4» и «Штайнберг» PR-1S (A) представлены в табл. 3, 4. В качестве замедлителя сроков схватывания строительного гипса использована лимонная кислота (ГОСТ 908–2004).

Таблица 3

Технические характеристики суперпластификатора «Штайнберг МР-4»

Наименование	«Штайнберг МР-4»
Контроль качества	ГОСТ 24211, ГОСТ 30459, ТУ 20.59.59-001-45419370–2018
Внешний вид	Жидкость темно-коричневого цвета
Плотность раствора, $\text{кг}/\text{дм}^3$	$1,095 \pm 0,003$
Водородный показатель pH	7,0–11,0
Граничная дозировка, в % по готовому продукту от массы цемента	1,3–2,5
Оптимальная дозировка, в % по готовому продукту от массы цемента	1,6–2,0
Транспортирование и хранение	По ГОСТ 24211, при температуре не ниже $+5^\circ\text{C}$, в герметично закрытой таре
Срок хранения	1 год со дня изготовления
Форма поставки	Пластиковые канистры 5, 10, 20, 30, 50 л, бочки 200 л, специализированные емкости 1000 л, авто и ж.-д. цистерны, на розлив в тару потребителя

Таблица 4

Технические характеристики суперпластификатора «Штайнберг PR-1S (A)»

Наименование	«Штайнберг» PR-1S (A)
Внешний вид	Жидкость от прозрачного до светло-желтого цвета
Плотность раствора, $\text{кг}/\text{дм}^3$	$1,005 \pm 0,003$
Дозировка, в % по готовому продукту от веса цемента	0,1–2,0
Контроль качества	ГОСТ 24211, ГОСТ 30459
Срок хранения	1 год со дня изготовления

Оптимальное количество воды определялось опытным путем до достижения нормальной густоты гипсового теста (ГОСТ 125–2018).

Для сравнительных исследований образцов по величине прочности на сжатие использована методика малых образцов размером $2 \times 2 \times 2$ см, полученных из гипсового теста литьевым методом. Образцы хранились при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ в течение 28 сут при относительной влажности 70 %.

Микроструктурные исследования экспериментальных образцов проводились в лаборатории электронно-оптической диагностики Международного исследовательского научно-образовательного центра кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N (Hitachi, Япония) [21].

Результаты исследований

При взаимодействии остаточной кислоты и карбонатной муки в процессе химической реакции выделяется углекислый газ, который образует поры в строительном изделии. Так как фторангидрит является отходом производства плавиковой кислоты, а карбонатная мука получена в результате помола природного известняка, то это ведет к существенному снижению стоимости конечного изделия.

Для исследования влияния пластификаторов на свойства поризованных стеновых материалов разработаны составы с добавками суперпластификаторов в количестве от 1 до 10 % от массы гипса в пересчете на сухое вещество. В качестве основных критериев оценки свойств смеси и газогипсового материала использованы следующие параметры качества: диаметр расплава смеси, прочность образцов на сжатие, средняя плотность образцов. Влияние пластификаторов на диаметр расплава смеси представлен на рис. 1.

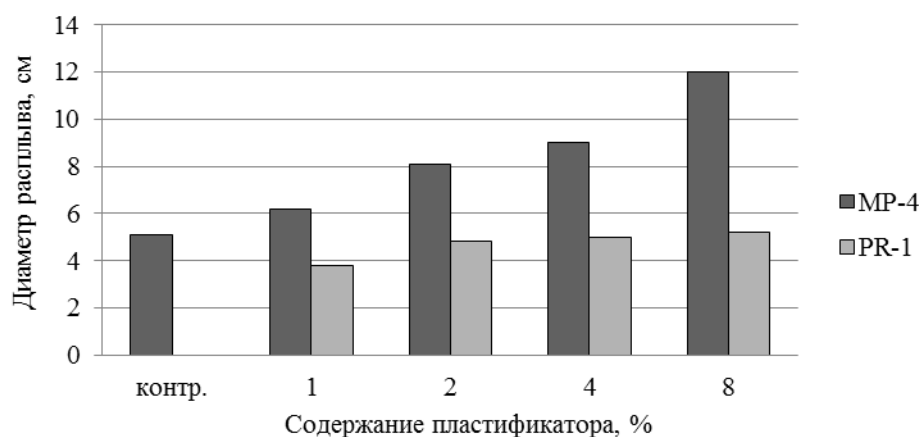


Рис. 1. Влияние пластификаторов на диаметр расплава смеси

По результатам исследований, величина расплава поризованной смеси зависит от вида и количества пластифицирующей добавки. При использовании пластификатора «Штайнберг МР-4» подвижность смеси резко возрастает при увеличении содержания пластификатора. Максимальная подвижность смеси наблюдается при содержании пластификатора в количестве 8 %. Дальнейшее увеличение содержания пластификатора нецелесообразно в связи

с ухудшением эксплуатационных характеристик образцов. Повышение количества пластификатора «Штайнберг PR-1S(A)» приводит к незначительному повышению расплыва смеси.

На рис. 2, 3 представлены результаты исследований по влиянию пластификаторов на величину средней плотности и прочности образцов.

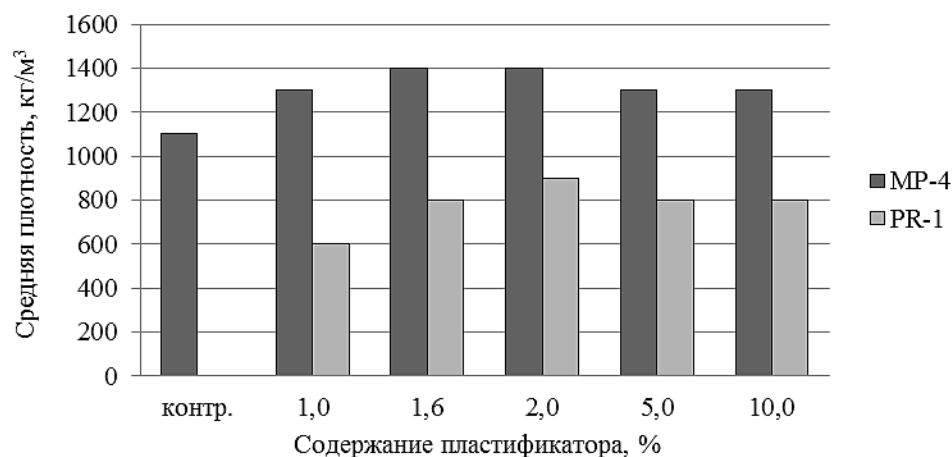


Рис. 2. Влияние пластификаторов на среднюю плотность образцов

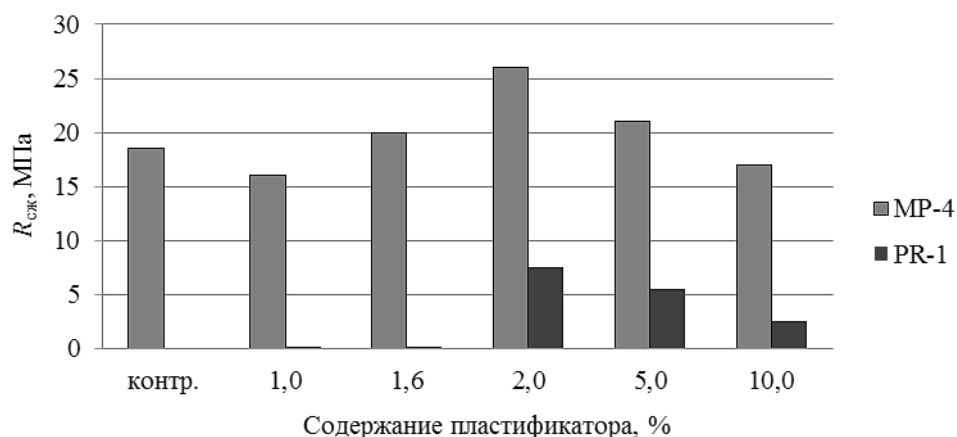


Рис. 3. Влияние пластификаторов на прочность образцов

Проведенные исследования показали, что влияние суперпластификаторов на величину прочности и средней плотности образцов носит экстремальный характер. Так, увеличение количества пластификатора «Штайнберг MP-4» до 2 % от массы гипсового вяжущего приводит к постепенному повышению средней плотности до 1400 кг/м³, при этом прочность образцов на сжатие составляет 27 МПа, дальнейшее повышение количества пластифицирующей добавки нерационально, поскольку прочность образцов на сжатие существенно снижается (рис. 2).

Средняя плотность образцов с пластифицирующей добавкой «Штайнберг PR-1S(A)» в количестве 1 % составляет 600 кг/м^3 , что в два раза ниже плотности контрольных образцов, составляющей 1100 кг/м^3 . При этом прочность образцов на сжатие с пластифицирующей добавкой «Штайнберг PR-1S(A)» мала, образцы разрушаются при незначительном усилии. Максимальная величина прочности образцов, составляющая 7,5 МПа, достигается при содержании добавок в количестве 2 % от массы гипсового вяжущего, что в 3 раза ниже прочности образцов с применением пластификатора «Штайнберг МР-4».

Анализ результатов по влиянию суперпластификаторов на прочность образцов показал, что количество пластификатора «Штайнберг МР-4» в 2 % от массы гипса является оптимальным для достижения высокой прочности, которая составляет 27 МПа. Это объясняется снижением водопотребности сырьевой смеси и участием поликарбоксилата в структурообразовании гипсового камня. Постепенное снижение прочности при содержании пластифицирующей добавки свыше 2 % в составе смеси обусловлено воздействием поликарбоксилатной составляющей на кинетику твердения и структуру камня. Добавка способствует дополнительному вовлечению пузырьков воздуха, следовательно, получению менее плотной структуры композита. Использование пластифицирующей добавки «Штайнберг PR-1S(A)» уменьшает прочностные характеристики образцов, максимальная прочность образцов составляет 7,4 МПа. На рис. 4 представлены внешний вид и микрофотографии образцов.

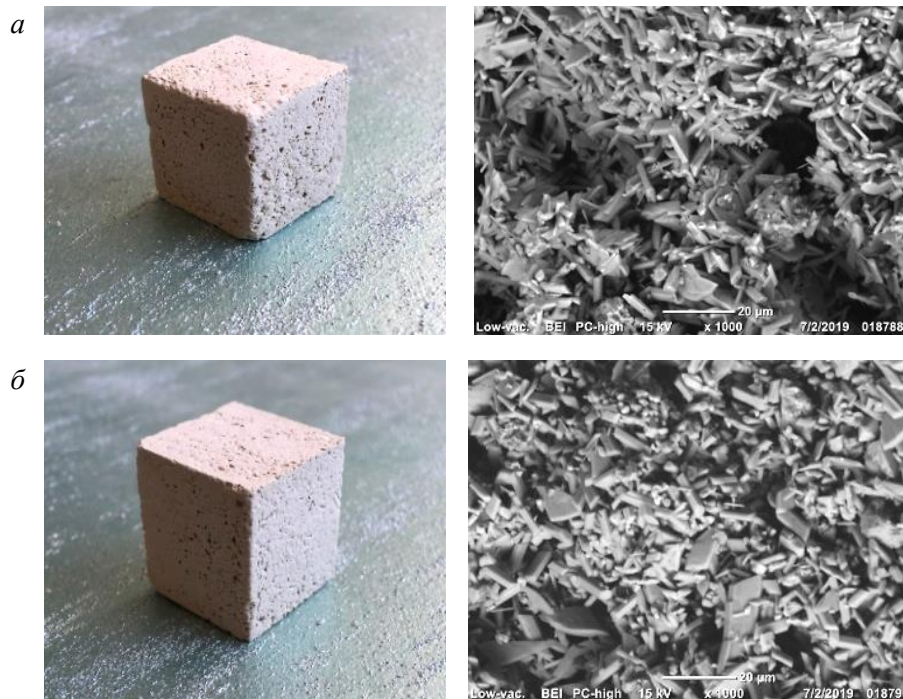


Рис. 4. Внешний вид образцов и электронно-микроскопические снимки с добавками:
а – суперпластификатора «Штайнберг PR-1S(A)»; *б* – суперпластификатора «Штайнберг МР-4»

Структура затвердевших образцов с добавкой пластификатора «Штайнберг МР-4» микропористая, с добавкой пластификатора Штайнберг PR-1S(A) – рыхлая, крупнопористая.

Расход компонентов и характеристика материалов по величине средней плотности с использованием пластификаторов «Штайнберг» представлены в табл. 5.

Таблица 5

Расход компонентов для рациональных составов газогипсовых материалов

Расход компонентов (кг) на 1 м ³ поризованной смеси							
ФТА	Карбонатная мука	Гипс	Лимонная кислота	Вода	PR-1	МР-4	ρ_m , кг/м ³
102,89	82,90	331,9	0,16	278,8	3,31	–	600
154,34	124,5	497,9	0,24	418,2	–	4,98	1100

По результатам, представленным в табл. 5, влияние пластифицирующих добавок на микроструктуру и эксплуатационные характеристики образцов существенно различаются. Так, пластифицирующая добавка «Штайнберг PR-1S(A)» оказывает существенное влияние на величину средней плотности образцов и образование высокопористой структуры (рис. 4, а), при этом плотность образцов составляет от 600 кг/м³, прочность образцов на сжатие – 0,43 МПа. При введении пластифицирующей добавки «Штайнберг МР-4» плотность и прочность образцов на сжатие увеличиваются до 1100 кг/м³ и до 27 МПа соответственно (рис. 4, б).

Полученные экспериментальные данные использованы для разработки технологической схемы производства газогипсовых материалов, по которой в состав строительного гипса вводится первоначально лимонная кислота и водный раствор пластифицирующей добавки. Расчетное количество газообразователей вводится в состав гипсовой смеси, перемешивается в течение 1–3 мин и разливается в формы. Твердение изделий рекомендовано проводить в естественных условиях или в сушильных камерах при температуре тепловой обработки не более 70 °С.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для получения газогипсовых материалов эффективно использовано введение в состав смеси кислого фторангидрита с дополнительным использованием карбоната кальция в качестве основных газообразующих компонентов. Исследование влияния пластифицирующих добавок «Штайнберг МР-4» и «Штайнберг PR-1S(A)» на свойства поризованной смеси выявило, что влияние пластифицирующих добавок носит неравнозначный характер. Оптимальным является введение суперпластификатора «Штайнберг МР-4» в количестве 2 % от массы гипса, который обеспечивает повышение прочности до 27 МПа и плотности материала до 1400 кг/м³, при этом обеспечивается высокая подвижность поризованной смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернышов Е.М., Потамошинева Н.Д., Монастырев П.В., Ярцев В.П. Строительно-технологическая утилизация техногенных отходов как комплексная системная эколого-экономическая проблема развития территорий и градостроительства // Вопросы современной науки и практики. 2016. № 4 (62). С. 67–86.
2. Пухаренко Ю.В., Харитонова Т.В. Оценка применения карбонатных заполнителей в составе сухих смесей для реставрации // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 121–125.
3. Kodzoev M.-B., Isachenko S., Kosarev S., Basova A., Skvortzov A., Asamatdinov M., Zhukov A. Modified gypsum binder // MATEC Web of Conferences. St. Petersburg, 2017. P. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/201817003022
4. Лесовик В.С., Чернышова Н.В., Клименко В.Г. Процессы структурообразования гипсо-содержащих композитов с учетом генезиса сырья // Известия вузов. Строительство. 2012. № 4. С. 3–11.
5. Пономаренко А.А., Капустин Ф.Л. Технология переработки фторангидрита для использования в производстве портландцемента // Химическая технология. 2011. № 6. С. 323–325.
6. Федорчук Ю.М. Техногенный ангидрит, его свойства, применение. Томск : Изд-во ТПУ. 2005. 110 с.
7. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худоверкова Е.А., Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 14–17. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-14-17
8. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magallanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction // 2 International conference on Bio-based Building materials. 2017. P. 1–5.
9. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum // Journal of Environmental Management. 2009. № 90 (8). P. 2377–2386.
10. Leonid D., Nataliya L., Mohammed S. Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: A review of research results // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 01012.
11. Кудяков А.И., Аниканова Л.А., Редлих В.В., Саркисов Ю.С. Влияние сульфата и сульфита натрия на процессы структурообразования фторангидритовых композиций // Строительные материалы. 2012. № 10. С. 50–53.
12. Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Волкова О.В., Федорчук Ю.М. Газогипсовые материалы с использованием вторичного сырья // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 6. С. 126–137.
13. Jassim Muhsin Aliewi, Abdul Qader Nihad Noori, Arshad Nadhom M. Ali. Effect of adding industrial wastes on the mechanical properties of gypsum // International Journal of Science and Research (IJSR). 2019. № 8. P. 2123–2125. DOI: 10.21275/ART2020736
14. Dominic Gazdic, Jana Mokra, Jan Hanacek. Influence of Plasticizers on Properties of Anhydrite Binder // Key Engineering Materials. 2018. P. 16–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.16
15. Белов В.В., Бурьянов А.Ф., Яковлев Г.И., Петропавловская В.Б., Фишер Х.-Б., Маева И.С., Новиченкова Т.Б. Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция. Москва : Де Нова, 2012. 196 с.
16. Peng J., Zhang J., Bai L., Li Q. Hydration and hardening characteristics of anhydrite binder modified with slag // Journal of Tongji University. 2009. P. 32–39.
17. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 18–24.
18. Устинова Ю.В., Сивков С.П., Барина О.П., Санжаровский А.Ю. Влияние различных добавок на морфологию кристаллов двуводного гипса // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 140–144.

19. Аниканова Л.А., Волкова О.В., Кудяков А.И., Курмангалиева А.И. Активированное композиционное фторангидритовое вяжущее // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 36–42. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42
20. Klimenko V.G. The role of a^+ , K^+ , Ca^+ , NH_4^+ sulfates based double salts in derivation of anhydrite binders // Vestnik BSTU named V.G. Shukhov. 2017. № 12. P. 119–124. DOI: 10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605
21. Lei Yang, Min Jing, Lingchao Lu, Xiantao Song, Xiaobin Dong. Properties and micro-structures assessment of building materials based on flue gas desulfurization gypsum modified by cement and industrial waste // Ceramics-Silikaty. 2019. P. 1–12. DOI: 10.13168/cs.2019.0009

REFERENCES

1. Chernyshov E.M., Potamoshneva N.D., Monastyrev P.V., Yartsev V.P. Stroitel'no-tehnologicheskaya utilizatsiya tekhnogennykh otkhodov kak kompleksnaya sistemnaya ekologo-ekonomicheskaya problema razvitiya territorii i gradostroitel'stva [Industrial waste utilization as a complex environmental and economic problem of territorial and urban development]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki*. 2016. No. 4 (62). Pp. 67–86. (rus)
2. Pukhareno Yu.V., Kharitonova T.V. Otsenka primeneniya karbonatnykh zapolnitelei v sostave sukhikh smesei dlya restavratsii [Carbonate aggregates in dry mixture compositions for restoration]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 4 (69). Pp. 121–125. (rus)
3. Kodzoev M.-B., Isachenko S., Kosarev S., Basova A., Skvortzov A., Asamatdinov M., Zhukov A. Modified gypsum binder. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/201817003022
4. Lesovik V.S., Chernyshova N.V., Klimenko V.G. Protsessy strukturoobrazovaniya gipsosoderzhashchikh kompozitov s uchetom genezisa syr'ya [Structure formation of gypsum-based composites given the raw material genesis]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2012. No. 4. Pp. 3–11. (rus)
5. Ponomarenko A.A., Ponomarenko A.A., Kapustin F.L. Tehnologiya pererabotki ftorangidrita dlja ispol'zovaniya v proizvodstve portlandcementsa. [Anhydrite processing technology in Portland cement manufacture]. *Himicheskaja tehnologija*. 2011. No. 6. Pp. 323–325. (rus)
6. Fedorchuk Yu.M. Tekhnogennyi ангидрит, ego svoistva, primenenie. [Industrial anhydrite, its properties and application]. Tomsk: TPU, 2005. 110 p. (rus)
7. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodina E.V., Nefed'ev A.P., Godovikov E.A., Buryanov A.F., Fischer H.-B. Aktivirovannye napolniteli dlya gipsovykh i ангидритovykh smesei [Activated fillers for gypsum and anhydrite mixtures]. *Stroitel'nye materialy*. 2018. No. 8. Pp. 14–17. (rus) DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-14-17
8. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magallanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. *Proc. 2nd Int. Conf. on Bio-Based Building Materials*. 2017. Pp. 1–5.
9. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*. 2009. No. 90 (8). Pp. 2377–2386.
10. Leonid D., Nataliya L., Mohammed S. Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: A review of research results. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Pp. 01012.
11. Kudyakov A.I., Anikanova, L.A., Redlikh V.V., Sarkisov Yu.S. Vliyanie sul'fata i sul'fita natriya na protsessy strukturoobrazovaniya ftorangidritovykh kompozitsii. [The effect of sulfate and sodium sulfite on structure formation of anhydrite compositions]. *Stroitel'nye materialy*. 2012. No. 10. Pp. 50–53. (rus)
12. Anikanova L.A., Kurmangaliev A.I., Volkova O.V., Fedorchuk Yu.M. Gazogipsovyye materialy s ispol'zovaniem vtorichnogo syr'ya [Foamed gypsum materials with fluoride additive]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 6. Pp. 126–137. (rus)
13. Jassim Muhsin Aliwi, Abdul Qader Nihad Noori, Arshad Nadhom M. Ali. Effect of adding industrial wastes on the mechanical properties of gypsum. *International Journal of Science and Research*. 2019. No. 8. Pp. 2123–2125. DOI: 10.21275 / ART2020736

14. *Dominic Gazdic, Jana Mokra, Jan Hanacek.* Influence of plasticizers on properties of anhydrite binder. *Key Engineering Materials*. 2018. Pp. 16–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.16
15. *Belov V.V., Bur'janov A.F., Jakovlev G.I., Petropavlovskaja V.B., Fisher H.-B., Maeva I.S., Novichenkova T.B.* Modifikacija struktury i svojstv stroitel'nyh kompozitov na osnove sul'fata kal'cija. [Modification of structure and properties of construction composites based on calcium sulphate]. Moscow: De Nova, 2012. 196 p. (rus)
16. *Peng J., Zhang J., Bai L., Li Q.* Hydration and hardening characteristics of anhydrite binder modified with slag. *Journal of Tongji University*. 2009. Pp. 32–39.
17. *Petropavlovskaya V.B.* Ispol'zovanie mineral'nykh ul'tradispersnykh modifikatorov na osnove otkhodov promyshlennosti v gipsovykh kompozitakh [Mineral ultrafine modifiers based on industrial waste in gypsum composites]. *Stroitel'nye materialy*. 2018. No 8. Pp. 18–24. (rus)
18. *Ustinova Yu.V., Sivkov S.P., Barinova O.P., Sanzharovskii A.Yu.* Vliyanie razlichnykh dobavok na morfologiyu kristallov dvuvodnogo gipsa [Influence of various additives on crystal morphology of calcium sulfate dihydrate]. *Vestnik MSBU*. 2012. No. 4. Pp. 140–144. (rus)
19. *Anikanova L.A., Volkova O.V., Kudyakov A.I., Kurmangalieva A.I.* Mechanically activated composite fluoroanhydrite binder. *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 1–2. Pp. 36–42. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42. (rus)
20. *Klimenko V.G.* The role of α -, K^+ , Ca^+ , NH_4^+ sulfates based double salts in derivation of anhydrite binders. *Vestnik BSTU*. 2017. No. 12. Pp. 119–124. DOI: 10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605
21. *Lei Yang, Min Jing, Lingchao Lu, Xiantao Song, Xiaobin Dong.* Properties and micro-structures assessment of building materials based on flue gas desulfurization gypsum modified by cement and industrial waste. *Ceramics-Silikaty*. 2019. Pp. 1–12. DOI: 10.13168 cs.2019.0009

Сведения об авторах

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

Курмангалиева Анна Ильясовна, инженер, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, puma3027@mail.ru

Волкова Ольга Витальевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, v.olga.nikitina@gmail.com

Первушина Дарья Максимовна, студентка, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, pervushina.daryaOO@mail.ru

Authors Details

Ljubov' A. Anikanova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alasmit@mail.ru

Anna I. Kurmangalieva, Engineer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, puma3027@mail.ru

Ol'ga V. Volkova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, v.olga.nikitina@gmail.com

Dar'ya M. Pervushina, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, pervushina.daryaOO@mail.ru

УДК 691.21:53.096

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-118-132

*Т.Н. НЕМОВА, В.С. РЕКУНОВ, Н.А. ЦВЕТКОВ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

РАЗРУШЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (КИРПИЧ, БЕТОН, ГРАНИТ) ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУЙ

В статье представлены результаты экспериментального исследования разрушения некоторых строительных материалов высокотемпературными гетерогенными струями продуктов сгорания твердых топлив. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности зданий и сооружений специального назначения при экстремальных тепловых воздействиях на элементы их конструкций. Целью работы являлось установление основных закономерностей разрушения неметаллических конструкционных материалов (кирпич, бетон, гранит) при воздействии на них высокотемпературных гетерогенных струй продуктов сгорания твердых топлив и разработка на их основе физической модели процесса. Для проведения экспериментов использовался газодинамический стенд, позволяющий варьировать давление торможения потока; в качестве характеристик выбраны величины массовой скорости разрушения материала и глубины образующихся кратеров. Получены зависимости массовых скоростей разрушения и глубин кратеров от давления торможения в сравнении с аналогичными данными для стали. Приведены данные по расчетам величин напряжений в приповерхностном слое материала. Предложена физическая модель процесса разрушения неметаллических конструкционных материалов, основанная на превышении возникающих в приповерхностном слое материала напряжений предела прочности материала.

Ключевые слова: строительные материалы; гетерогенная струя; газодинамический стенд; параметры струи; массовая скорость разрушения; предел прочности материала; напряжения на границе раздела.

Для цитирования: Немова Т.Н., Рекунов В.С., Цветков Н.А. Разрушение строительных материалов (кирпич, бетон, гранит) при высокотемпературном тепловом воздействии гетерогенных струй // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 118–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-118-132

*T.N. NEMOVA, V.S. REKUNOV, N.A. TSVETKOV,**Tomsk State University of Architecture and Building*

DESTRUCTION OF BUILDING MATERIALS (BRICK, CONCRETE, GRANITE) UNDER HIGH-TEMPERATURE EVAPORATION OF HETEROGENEOUS COMBUSTION PRODUCTS

The paper presents the research results of the building material destruction due to high-temperature evaporation of heterogeneous solid-fuel combustion products. The aim of this work is to determine basic laws of destruction of non-metallic constructional materials (brick, concrete, granite) under the influence of high-temperature evaporation of heterogeneous solid-fuel combustion products and develop a physical model of the process. A gas-dynamic setup is used to conduct the experiments, which allows to vary the stagnation pressure. The destruction rate of the material and the depth of resulting craters are chosen as characterization parameters.

The dependence of the destruction rate and the crater depth on the stagnation pressure is compared with the similar data for steel. The stress values are obtained for the surface layer of the material. The proposed physical model of the destruction process of non-metallic constructional materials is based on excess of stresses of the material strength limit arising in its subsurface layer. The obtained results can be used to ensure the safety of special-purpose buildings at extreme thermal effects on the structural elements.

Keywords: construction materials; heterogeneous flow; destruction rate; gas-dynamic setup; flow parameters; mass velocity; ultimate strength; interface stress.

For citation: Nemova T.N., Rekunov V.S., Tsvetkov N.A. Razrushenie stroitel'nykh materialov (kirpich, beton, granit) pri vysokotemperaturnom teplovom vozeistvii geterogennykh strui [Destruction of building materials (brick, concrete, granite) under high-temperature evaporation of heterogeneous combustion products]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 118–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-118-132

При проектировании и строительстве зданий и сооружений специально-го назначения одним из основных критериев является обеспечение их прочности и устойчивости при экстремальных тепловых воздействиях. Пожарная безопасность при этом достигается выбором соответствующих материалов несущих элементов строительных конструкций с определенными пределами огнестойкости [1].

Степень разрушения строительных конструкций при воздействии открытого огня определяется свойствами материалов конструкций. Так, наибольшему разрушению, чаще всего носящему фатальный характер, подвергаются конструкции, изготовленные из дерева или составляющих.

Стальные конструкции более устойчивы к высокотемпературному воздействию, однако при определенных температурах (выше 600 °C) вследствие преимущественного использования малоуглеродистых сталей они значительно деформируются.

В железобетонных конструкциях происходящие необратимые изменения также связаны с температурными деформациями металла, что приводит к снижению прочности материала.

В бетонах в диапазоне температур 250–300 °C происходит изменение структуры и уменьшение прочностных характеристик цементного камня, в результате чего материал растрескивается, а при более высоких температурах полностью разрушается [2].

Однако наряду с воздействием открытого огня на конструкционные материалы, применяемые в строительстве, возможны ситуации, когда разрушение материалов вследствие техногенных катастроф обусловлено воздействием высокотемпературных тепловых струй различной природы, в том числе гетерогенных струй, генерированных сгоранием различных топлив, содержащих частицы металла (теплоэрозионное разрушение) [3, 4]. Вопросам механизма и физическим моделям процесса разрушения материалов в этих случаях до настоящего времени уделено мало внимания.

Так, в работах [3–8] приведены результаты исследования механизма разрушения стали высокотемпературными газовыми и гетерогенными струями с высоким содержанием частиц металла (железо, алюминий). Установлено

[8], что повышение концентрации частиц в струе приводит к увеличению массовой скорости разрушения стали. Механизм разрушения является неударным и не сопровождается плавлением материала, о чем свидетельствует низкая относительно температуры плавления величина температуры материала в момент разрушения, а также результаты качественного и количественного анализа структур стали в области разрушения. Сделан вывод о том, что разрушение сталей обусловлено структурными изменениями, происходящими в материале при тепловом воздействии, и переходе его в вязкотекучее состояние.

В современной научной литературе практически отсутствуют данные по физическим моделям процессов разрушения таких конструкционных строительных материалов, как бетон, гранит, мрамор, кирпич, при воздействии на них высокотемпературных гетерогенных струй. Однако предполагать идентичность механизмов разрушения сталей и бетона (гранита, мрамора, кирпича) [9] без проведения специальных исследований было бы в корне неверно.

В технологиях резки и сварки конструкционных материалов широко используется сфокусированное лазерное излучение, позволяющее исключить применение трудоемких операций и увеличить скорость резки [10]. Основными определяющими процесс резки параметрами приняты глубина и ширина реза. Однако следует отметить некоторую формализацию результатов, обусловленную отсутствием сравнительного анализа данных, полученных для материалов разной природы.

Сложность в интерпретации экспериментальных результатов во всех способах воздействия на конструкционные материалы заключается в том, что кирпич, бетон, гранит, мрамор не являются «чистыми» по составу и структуре материалами, а представляют собой сложные природные или искусственно созданные образования, включающие в себя разнородные по составу и свойствам компоненты (гранит, мрамор) [1]. Тем не менее широкое применение таких материалов в строительстве приводит к необходимости исследования параметров конкретных процессов теплового и эрозионного воздействия как для выбора оптимальной технологии обработки (резки и перфорации) материалов, так и для создания новых перспективных материалов [11, 12].

В связи с этим целью настоящей работы является установление основных закономерностей разрушения неметаллических конструкционных материалов высокотемпературными гетерогенными струями.

Методы исследования

Экспериментальные исследования были проведены с помощью газодинамического стенда по методике [5, 6]. Основным элементом стенда являлся газогенератор, включающий в себя камеру сгорания, в которую помещалось твердое топливо, содержащее частицы металла (алюминий, железо) массовой концентрацией до 0,3, сопловой блок, системы зажигания и регистрации давления в камере. Температура продуктов сгорания топлива составляла 3000 К.

Использование твердотопливного варианта стенда обеспечивало устойчивое горение топлива при давлении до 5 МПа, а также позволило варьировать состав и концентрацию частиц в струе продуктов сгорания без применения сложных систем подачи частиц в струю.

Для оценки параметров воздействия струи на материалы были проведены расчеты одиночной сверхзвуковой струи в области непрерывного течения вблизи среза сопла и в области разрежения. Максимально возможные размеры струи (максимальный радиус y_m , образующий границы струи, и его осевая координата x_m) для степени нерасчетности $n \leq 20$ определены из следующих зависимостей [13]:

$$y_m = \frac{2}{k \cos^2 \alpha} n^{0,43}, \quad x_m = 2,6 \frac{M_a^2}{M_a^2 + 1} n^{0,39},$$

где α – угол полураствора сопла в выходном сечении; M_a – значение числа Маха на срезе сопла. Для используемых в экспериментах осесимметричных сопел с углом раствора $\alpha = 3^\circ$ значения y_m и x_m в единицах, равных отношению максимального радиуса и осевой координаты к радиусу выходного сечения сопла, составляют 2,64 и 5,07 соответственно.

Оценки параметров сверхзвуковой струи (давление, скорость, число Маха и плотность) в критическом сечении сопла, на срезе сопла и в сечении струи, соответствующем максимальным значениям y_m и x_m торможения, были проведены по полученным экспериментальным значениям давления в камере газогенератора при горении топлива и температуре продуктов сгорания [6, 8]. Погрешность измерения давления в камере сгорания тензометрическими датчиками типа ЛХ-412 составляла 6 %.

В результате проведения серии экспериментов определено расстояние от среза сопла до поверхности образца конструкционного материала, равное $x = 4\text{--}4,8$ ($x = L / r_a$, где L – расстояние от среза сопла до образца; r_a – радиус выходного сечения сопла) и соответствующее оптимальному режущему воздействию струи на материал. Уменьшение этого расстояния приводит к разрушению сопла продуктами сгорания топлива, а увеличение – к снижению массовой скорости разрушения материала, а следовательно, и к снижению эффективности резки и перфорации.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальные параметры высокотемпературной струи (скорость 2836 м/с, число Маха 3,42, плотность 0,116 кг/м³) соответствуют области максимального радиуса воздействующей на материал струи.

Для экспериментальных исследований были изготовлены опытные образцы гранита и бетона. Образцы гранита представляли собой 2–3 пластины, собранные в пакет. Образцы бетона состояли из агломерата отвердевшего цементного камня (как результата гидратации смеси, включающей порошки алюмосиликатов), мелкого и крупного минерального камня и воды. В качестве керамических материалов были использованы стандартные красные кирпичи марок 75–100.

В качестве параметров, характеризующих процесс разрушения конструкционных материалов, были приняты величины массовой скорости разрушения и глубин кратеров, образующихся в результате воздействия высокотемпературной гетерогенной струи на материал. Массовая скорость разрушения рассчитывалась согласно [6, 8] по экспериментально определенным с помощью термопар величинам линейной скорости разрушения материала и его плотности. Для это-

го на задние стенки пластин гранита по оси струи устанавливались хромель-алюмелевые термопары. В образцах бетона термопары располагались по толщине образцов в процессе их изготовления соосно со струей.

Плотность гранита, бетона и кирпича для расчета скорости массового разрушения материалов определялась экспериментально, т. к. для гранитов разного состава величина плотности несколько различается, а для бетона и кирпича она существенно зависит от соотношения составляющих их компонентов.

Образцы с установленными в них термопарами с помощью специального держателя закреплялись перпендикулярно оси гетерогенной струи на расстоянии $(10-15)10^{-3}$ м от выходного сечения сопла. Время эксперимента определялось по осциллограмме давления и не превышало 1 с. После эксперимента проводился визуальный анализ внешнего вида образцов.

Так как высокотемпературная гетерогенная струя представляет собой смесь газообразных продуктов сгорания и частиц полидисперсного состава [5], а присутствие частиц в струе приводит к повышению эффективной плотности струи, то были проведены исследования по оценке напряжений на границе материал – капля расплава металла (окисла металла), возникающих при ударе капли по поверхности твердого тела. Согласно [14], принимается ряд допущений, снижающих уровень давления на площадке соприкосновения капли с конструкционным материалом, вследствие чего получены нижние оценки нагрузок на поверхность твердого тела при ударе капли, однако в целом метод адекватно описывает физико-механические процессы в малой по размерам зоне взаимодействия.

Считаем, что в момент удара капли расплава о поверхность конструкционного материала на участке соприкосновения возникает сила, направленная по нормали к поверхности взаимодействия. Удар в реальных условиях происходит под определенным углом атаки, много меньшим 90° . Эта сила вызывает появление волн напряжений, распространяющихся как вдоль поверхности, так и вглубь материала. Изменение напряжений поперек фронта волн и соответствующие сдвиговые и нормальные напряжения в тонком прилегающем к поверхности слое материала и приводят к его разрушению. Величины всех напряжений, действующих в этом слое, в основном определяются величиной напряжений, действующих на границе, и свойствами материала.

В соответствии с [14] величина напряжений на поверхности контакта конструкционного материала с каплей расплава может быть определена следующей зависимостью:

$$\sigma_{\Gamma} = \frac{\rho_1 C_1 V_1 \cos \varphi}{1 + C_1 \rho_1 / C_2 \rho_2},$$

где C – скорость звука; ρ – плотность; V – скорость капли; φ – угол между нормалью к поверхности взаимодействия и вектором скорости капли (угол атаки); индексы 1 и 2 соответствуют капле расплава и конструкционному материалу.

Результаты экспериментов

На рис. 1, а – в приведены фотографии внешнего вида типичных кратеров, образовавшихся соответственно в образцах гранита, бетона и кирпича

в результате воздействия высокотемпературной гетерогенной струи. На поверхности всех образцов вокруг кратера отмечено осаждение темного слоя конденсированных продуктов разрушения материала и сгорания топлива. Под ним – разрушенный на глубину $(1-2)10^{-3}$ м поверхностный слой конструкционного материала.

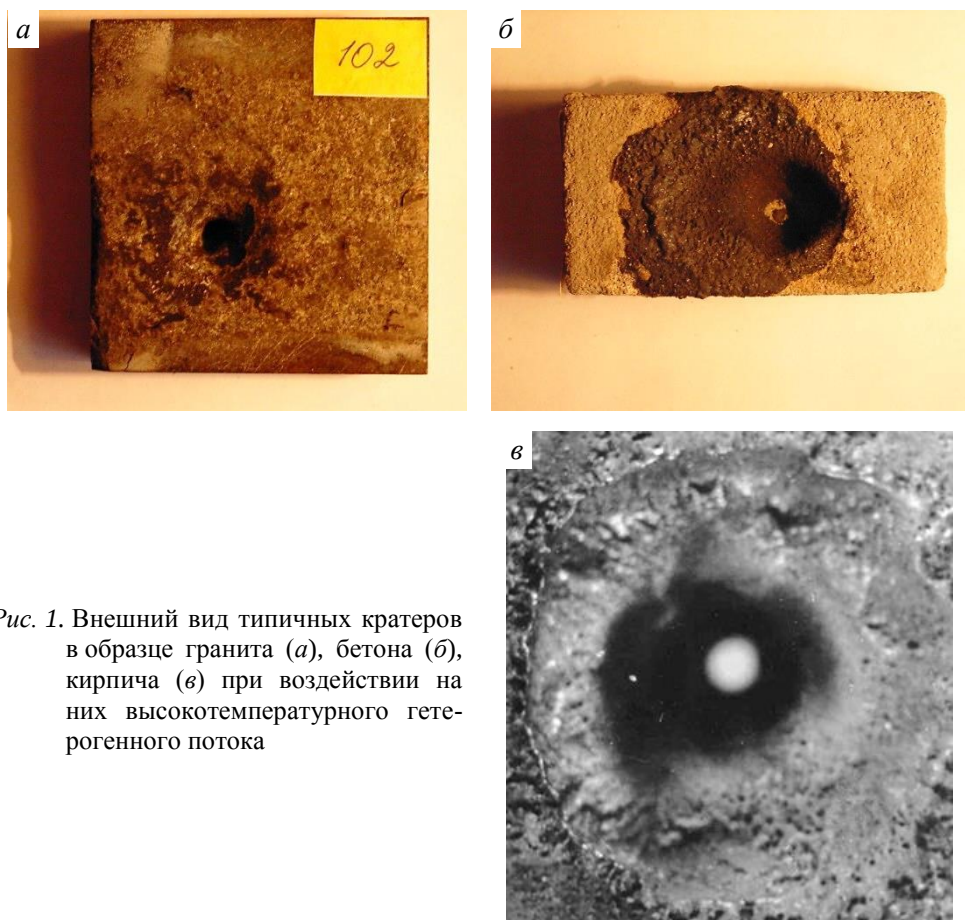


Рис. 1. Внешний вид типичных кратеров в образце гранита (а), бетона (б), кирпича (в) при воздействии на них высокотемпературного гетерогенного потока

Зона воздействия струи на гранит, в границах которой наблюдалось разрушение поверхностного слоя, имела диаметр, равный диаметру входной части кратера, что соответствует аналогичным параметрам, полученным для стали [7]. Поверхность материала при этом, даже вне зоны разрушающего воздействия струи продуктов сгорания, имела рыхловатую чешуйчатую структуру. Визуально весь образец материала в результате термического воздействия претерпевал существенные изменения. Это выражалось в том, что все образцы гранита изменяют свою окраску, становясь серовато-мутными. При этом очертания кристаллов, составляющих гранит, на срезе несколько размываются.

Следует отметить, что ни на поверхности образца гранита, ни на стенках и в полости образующегося кратера не отмечено следов расплава компонентов, составляющих гранит, и прежде всего кварца.

На образцах бетона темный слой на поверхности материала вокруг образующегося кратера визуально представлял собой пористую пенистую массу с ярко выраженными следами расплава двуокиси кремния. При попытке отделить этот слой от поверхности бетона он отслаивался вместе со слоем исходного материала. При этом область разрушения поверхностного слоя значительно больше соответствующих областей для стали и гранита (диаметр области разрушения в два раза превышает диаметр входной части кратера). Это может быть обусловлено более низкой температурой плавления компонентов бетона по сравнению с соответствующей величиной для гранита.

Разрушение красного кирпича также сопровождалось образованием кратера, при этом размеры зоны воздействия высокотемпературной струи соответствуют аналогичной величине для бетона. Кроме того, как и для бетона, на поверхности материала в границах зоны воздействия струи наблюдались следы расплава в виде пористой блестящей массы, характерной для двуокиси кремния.

На рис. 2 и 3 приведены основные экспериментальные закономерности: изменение массовой скорости разрушения гранита и стали (рис. 2) и глубины образующихся в этих материалах кратеров (рис. 3) в зависимости от давления торможения.

Влияние давления торможения на массовую скорость разрушения хорошо согласуется для гранита и стали и носит линейный характер (рис. 2).

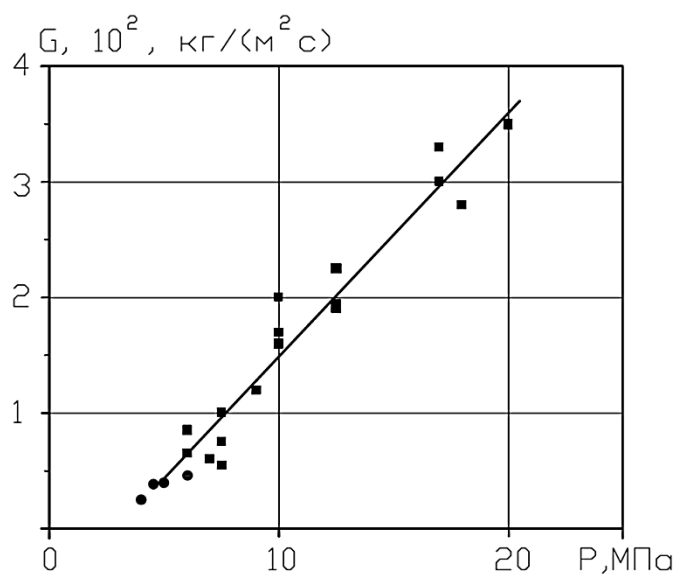


Рис. 2. Зависимость массовой скорости разрушения гранита от давления торможения в сравнении с аналогичными данными для стали:

● — гранит; ■ — сталь

Зависимость глубин образующихся кратеров от давления торможения также хорошо согласуется для гранита и стали. Для бетона глубина кратеров при тех же условиях эксперимента почти в два раза больше соответствующей величины для гранита и стали.

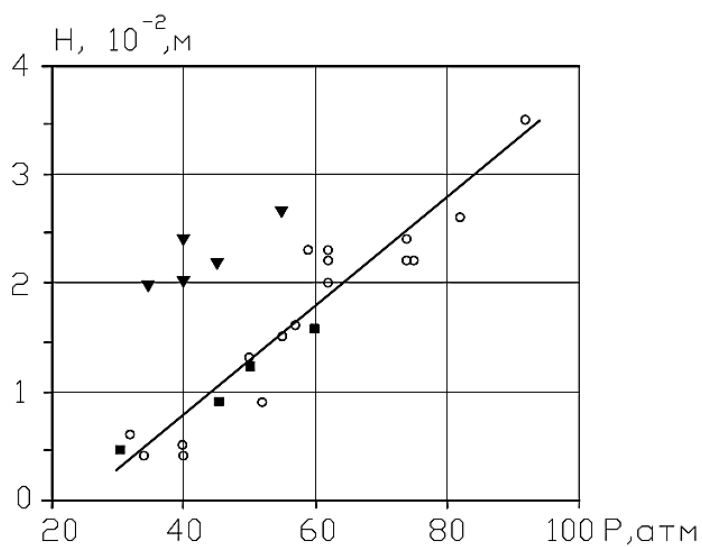


Рис. 3. Зависимость глубины разрушения конструктивных материалов от давления торможения:

■ – гранит; ▼ – бетон; ○ – сталь

Расчет возникающих величин напряжений в поверхностном слое проведен для таких конструктивных материалов, как сталь, гранит, бетон, и топлив, содержащих частицы алюминия, железа, а также смеси частиц алюминия и железа в стехиометрическом соотношении 13:10 соответственно.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости величин напряжений в стали при воздействии частиц алюминия, железа и их смеси от угла атаки.

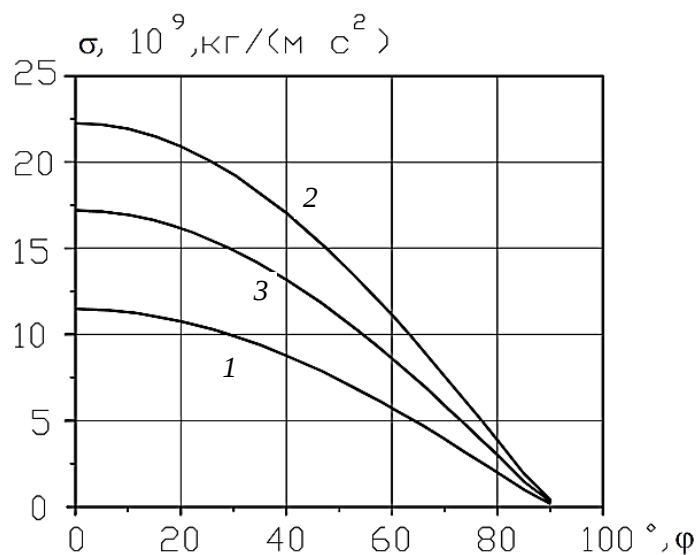


Рис. 4. Зависимости изменения величин напряжений в стали при воздействии частиц алюминия (кривая 1), железа (кривая 2) и их смеси (кривая 3) от угла атаки

Для всех кривых с увеличением угла атаки величины напряжений в материале уменьшаются. Максимальные значения напряжений достигаются при угле атаки, равном 0. Для частиц с большей плотностью величины напряжений существенно выше. Так при воздействии частиц железа величина напряжений в стали увеличивается почти вдвое по сравнению с воздействием частиц алюминия (рис. 4). Кривая величин напряжений для смеси частиц лежит между соответствующими кривыми для компонентов смеси. Аналогичные зависимости получены для бетона и гранита.

На рис. 5 приведены в сравнении зависимости величин напряжений, возникающих в стали, граните и бетоне при воздействии частиц алюминия и железа. Для всех материалов верхние кривые соответствуют частицам железа, нижние – частицам алюминия, при этом области, ограниченные этими кривыми, для разных материалов не пересекаются. Аналогичные зависимости для этих же конструкционных материалов при воздействии на них смеси частиц алюминия и железа в соотношении 13:10 приведены на рис. 6.

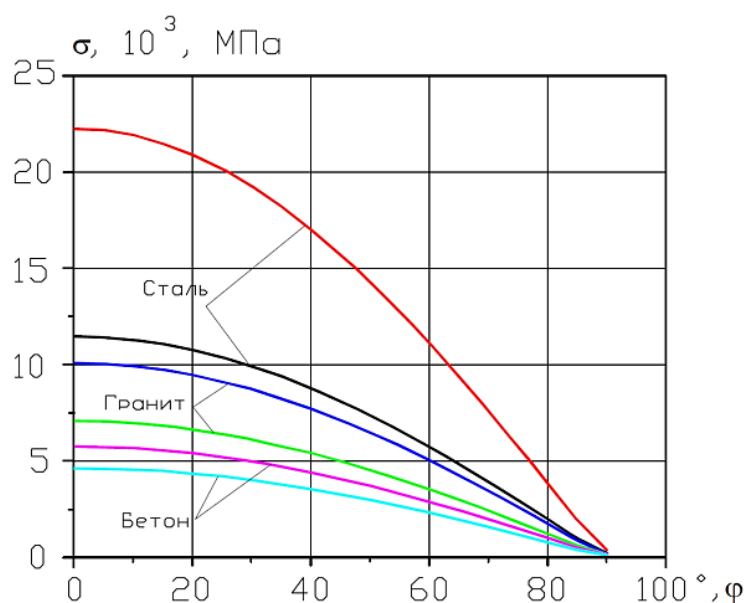


Рис. 5. Зависимости изменения величин напряжений в стали, граните и бетоне при воздействии частиц алюминия и железа. Верхние кривые соответствуют частицам железа, нижние – частицам алюминия

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что величины напряжений в исследованных конструкционных материалах повышаются с увеличением эффективной плотности струи вследствие увеличения плотности материала частиц (величина напряжений для частиц железа выше по сравнению с частицами алюминия). Для одинаковых частиц величина напряжений в материале повышается по шкале бетон – гранит – сталь.

При нагреве неметаллических конструкционных материалов свыше 100 °С вследствие происходящих в материалах физико-химических процессов

их прочность (особенно динамическая) снижается¹. Поэтому при исследовании процесса их разрушения в данных условиях необходимо оценить степень влияния температуры.

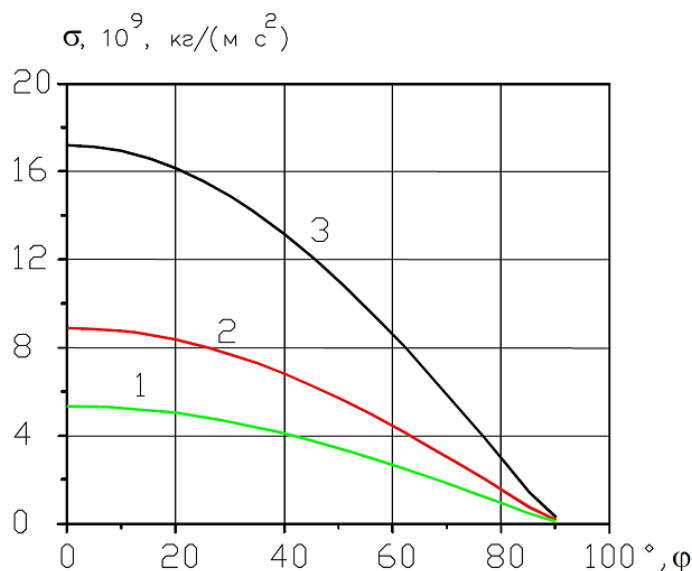


Рис. 6. Зависимости изменения величин напряжений в бетоне (кривая 1), граните (кривая 2) и стали (кривая 3) при воздействии гетерогенной высокотемпературной струи смеси частиц алюминия и железа

В таблице приведены известные значения пределов прочности бетона, гранита и стали при температуре 18 и 500 °С, а также рассчитанные по приведенной выше методике величины напряжений в приповерхностном слое материалов при температуре 18 °С.

Параметры	Бетон	Гранит	Сталь
σ_B , МПа (18 °С)	$0,4 \cdot 10^2$	$10^2 - 1,6 \cdot 10^2$	$0,43 \cdot 10^3$
σ_B , МПа (500 °С)	$0,24 \cdot 10^2 - 0,08 \cdot 10^2$	$0,6 \cdot 10^2 - 0,96 \cdot 10^2$	$0,23 \cdot 10^3$
σ_T , МПа	$5,5 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$17,2 \cdot 10^3$
Плотность, кг/м ³	2200	2620	7800
Твердость		6–7	6–8

Анализ данных таблицы показал, что рассчитанные величины напряжений в подповерхностном слое стали, бетона и гранита даже при нормальной

¹ СП 52-110-2009. Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим повышенным и высоким температурам. Москва: ФГУП НИЦ Строительство, 2009; ГОСТ 379-2015. Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.

температуре выше предела прочности для этих материалов. При повышении температуры до 500 °С разница соответственно увеличивается. Величина предела прочности конструкционных материалов при температурах 18 и 500 °С увеличивается по шкале бетон – гранит – сталь, что хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными (см. рис. 2 и 3). Величины плотности материалов увеличиваются по шкале бетон – гранит – сталь, а диапазоны твердости гранита и стали пересекаются.

Таким образом, скорость массового разрушения (и глубина перфорации) конструкционных материалов определяется физическими свойствами материалов.

Физическая модель разрушения конструкционных материалов

Анализ представленных выше экспериментальных и расчетных результатов позволяет утверждать, что механизм разрушения конструкционных материалов, как и для сталей, обусловлен его уносом при превышении напряжений, возникающих в приповерхностном слое, предела прочности материала. С изменением угла атаки, когда воздействующие частицы движутся вдоль поверхности, разрушение материалов происходит при превышении напряжений предела прочности материала при срезе. Для расчетов в технике предел прочности при срезе принимается обычно равным аналогичным величинам, в частности, при динамическом воздействии.

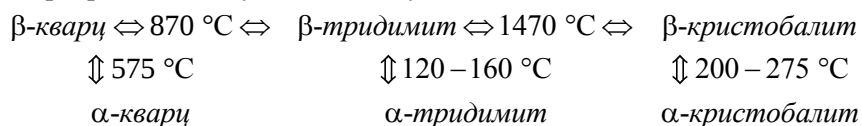
В начальный момент воздействия на поверхности материала образуется веерная полуограниченная струя, границы которой определены настоящей работой. В сверхзвуковой части струи процессы переноса наиболее интенсивны. Диаметр входной части формирующегося кратера не меняется со временем, соответствуя тому, какой образуется в начальный момент. Растекание струи и унос материала происходят вдоль поверхности материала при выполнении условия равенства касательных напряжений и предела прочности вследствие абразивного действия частиц металла, содержащегося в топливе, и движущихся вдоль поверхности в режиме «трение – скольжение».

Увеличение эффективной плотности струи приводит к увеличению величин касательных напряжений трения струи и, соответственно, к интенсификации разрушения (уноса) материала.

Гранит и бетон, в состав которых входят одинаковые компоненты, в частности алюмосиликаты, значительно различаются по структурному строению. Гранит представляет собой сложную полнокристаллическую породу магматического происхождения, содержащую до 70 % кварца [15], и, по сравнению с бетоном, имеет упорядоченную решетчатую тетраэдрическую кристаллическую структуру. В силу этого твердость гранита будет выше, чем для материалов с аналогичным составом, но неупорядоченной структурой, каковым и является бетон [16]. В бетоне эти составляющие не образуют общей системы, имеющей кристаллическую структуру и отличающейся повышенной твердостью и механической прочностью. Поэтому в результате динамического или режущего воздействия на бетон даже при нормальных условиях происходит ослабление в первую очередь связи цементный камень – наполнитель, что приводит к значительным деформациям, обуславливающим резкое снижение прочности материала.

Повышение температуры (даже кратковременное) приводит к значительному снижению прочности бетона вследствие протекания процесса дегидратации. Наличие паров воды, которые присутствуют в газообразных продуктах сгорания топлива, и химическое взаимодействие их с окислами кальция приводит к локальному увеличению объема, что снижает прочность бетона и интенсифицирует процесс его разрушения.

В основном наполнителем бетона является песок, состоящий из 60–95 % двуокиси кремния, которая существует в трех кристаллических модификациях: кварц, тридимит и кристобалит. При нагревании происходят модификационные превращения, идущие по следующей схеме:



При температуре 1710 °C образуется расплав. Эти процессы в совокупности с дегидратацией приводят уже при относительно невысоких температурах к повышению напряжений в конструкционном материале и нарушению механических связей кварца с цементным камнем. Механическая прочность цементного камня при 500 °C уменьшается в 5 раз [17]. При этом наличие частиц в высокотемпературной гетерогенной струе способствует интенсификации разрушения бетона.

Физико-химические превращения в бетоне при нагреве его высокотемпературной гетерогенной струей и визуальный анализ образцов после экспериментов позволили сделать вывод о том, что глубина модификационных превращений в бетоне значительна и достигает стадии появления вязкого расплава. Удаление его из зоны разрушения по сравнению с мелкодисперсными продуктами разрушения, например сталей, возможно при повышенных скоростях возвратной струи. Вследствие этого на поверхности материала фиксируются следы расплава.

Разрушение керамических материалов, в частности красного кирпича, характеризуется тем, что вследствие его состава (в основном обычная глина $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, содержащая большое количество железа и песка) нагрев его до 800–1000 °C не приводит к плавлению. При повышении температуры происходит плавление, сопровождаемое вспучиванием расплава вследствие выделения газов.

Процесс разрушения керамических материалов (красного кирпича) может быть представлен следующим образом. При воздействии высокотемпературной гетерогенной струи происходит прогрев поверхностного слоя материала и последующий унос его с поверхности. При движении частиц материала в возвратной струе происходит их прогрев, сопровождающийся плавлением и образованием вязкого расплава. Так как скорость возвратной струи недостаточна для удаления вязкого расплава с поверхности конструкционного материала у входной части кратера, расплав растекается по поверхности и застывает в виде пористой стекловидной массы, как отмечено при визуальном анализе внешнего вида образцов (см. рис. 1, в).

Таким образом, процессы разрушения материалов с кристаллической структурой и близкими значениями величин твердости (как гранит и сталь) при воздействии на них высокотемпературных гетерогенных струй с большой концентрацией частиц характеризуются близкими параметрами разрушения (глубина и массовая скорость). В отличие от них разрушение конструкционных материалов с неупорядоченной структурой (и более низкими величинами твердости) происходит по тому же механизму, но характеризуется большими значениями глубин перфорации и величин массовой скорости разрушения. С учетом физических свойств конструкционных материалов экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными данными.

Выводы

Механизм разрушения конструкционных материалов высокотемпературной гетерогенной струей обусловлен уносом материала при превышении напряжений, возникающих в приповерхностном слое, предела прочности материала.

Напряжения, возникающие в исследованных конструкционных материалах, повышаются с увеличением эффективной плотности струи. При прочих равных условиях величина напряжений зависит от предела прочности материала и повышается по шкале бетон – гранит – сталь.

Процесс разрушения бетона и кирпича сопровождается плавлением основного компонента материалов – кварца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киреева Ю.И. Современные строительные материалы и изделия. Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. 245 с.
2. Пушенко А.С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 2008. 217 с.
3. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. Москва : Янус-К, 2007. 392 с.
4. Михатулин Д.С., Немова Т.Н., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Гетерогенные режущие устройства: оптимизация газодинамического тракта разгона частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8. № 2. С. 301–310.
5. Кузнецов Г.В., Немова Т.Н., Савельева Л.А. Влияние состава и процесса горения металлизированных твердых топлив на интенсивность разрушения конструкционных материалов струей продуктов сгорания // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 6. С. 89–95.
6. Абалтусов В.Е., Кузнецов Г.В., Немова Т.Н. Механизм высокотемпературного разрушения металлов под действием гетерогенной струи с высокой концентрацией частиц // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 3. С. 438–444.
7. Немова Т.Н., Колесникова Е.А. Определение температурного поля подложки под каплей расплава методом выравнивания температур соседних слоев // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 12-2. С. 195–199.
8. Kuznetsov G.V., Alekseenko N.N., Nemova T.N. Steel destruction under the action of high-temperature heterogeneous streams with a significant concentration of the particles // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 5. С. 79–86.
9. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Термомеханическое разрушение бетонной пластины под действием высокотемпературной гетерогенной струи // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 61–68.
10. Букатый В.И., Перфильев В.О., Шараухов Н.Н. Исследование цветовым пирометром динамики температуры мрамора и гранита при воздействии мощным лазерным излучением // Известия Алтайского государственного университета. 2005. № 1 (35). С. 93–96.

11. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г. Разработка плазменных технологий для стройиндустрии // Актуальные проблемы современности. 2017. № 1 (15). С. 150–154.
12. Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Процессы плавления силикатов в плазмохимическом реакторе // Бюллетень науки и практики : электронный журнал. 2017. № 2 (15). С. 59–62.
13. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. Москва : Машиностроение, 1991. 560 с.
14. Позняк И.М., Климов Н.С., Подковыров В.Л., Сафронов В.М., Житлухин А.М., Коваленко Д.В. Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2012. Вып. 4. С. 23–33.
15. Петрографический кодекс России. Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2008. С. 144. 200 с.
16. Туманов А. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва : Palmarium Academic Publishing, 2015. 104 с.
17. Семерилов И.С., Герасимова Е.С. Физическая химия строительных материалов. 2-е изд., стер. Москва : Флинта, 2017. 204 с.

REFERENCES

1. Kireeva Yu.I. Sovremennye stroitel'nye materialy i izdeliya [Modern building materials and products]. Rostov-on-Don: Feniks, 2010. 245 p. (rus)
2. Pushenko A.S. Vysokoprochnyi beton v usloviyakh vozdeystviya vysokikh temperatur : dis. ... kand. tekhn. nauk [High strength concrete under high-temperature conditions. PhD Thesis]. Rostov-on-Don, 2008. 217 p. (rus)
3. Mikhatulina D.S., Polezhaev Yu.V., Reviznikov D.L. Teploobmen i razrushenie tel v sverkhzvukovom geterogennom potoke [Thermal exchange and destruction of bodies in a supersonic heterogeneous flow]. Moscow: Yanus-K, 2007. 392 p. (rus)
4. Mikhatulina D.S., Nemova T.N., Polezhaev Yu.V., Reviznikov D.L. Geterogennye rezhushchie ustroystva: optimizatsiya gazodinamicheskogo trakta razgona chastits [Heterogeneous cutting devices: optimization of gas-dynamic particle acceleration path]. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2001. V. 8. No. 2. Pp. 301–310. (rus)
5. Kuznetsov G.V., Nemova T.N., Savel'eva L.A. Vliyanie sostava i protsessa goreniya metalizirovannykh tverdykh topliv na intensivnost' razrusheniya konstruktsionnykh materialov strui produktov sgoraniya [Influence of composition and combustion process of metallized solid fuels destructed by high-temperature evaporation of heterogeneous combustion products]. *Fizika goreniya i vzryva*. 2002. V. 38. No. 6. Pp. 89–95. (rus)
6. Abaltusov V.E., Kuznetsov G.V., Nemova T.N. Mekhanizm vysokotemperaturnogo razrusheniya metallov pod deystviem geterogennoi strui s vysokoi kontsentratsiei chastits [Mechanism of destruction of metals under high-temperature evaporation with high particle concentration]. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 1999. V. 37. No. 3. Pp. 438–444. (rus)
7. Nemova T.N., Kolesnikova E.A. Opredelenie temperaturnogo polya podlozhki pod kaplei rasplava metodom vyravnivaniya temperatur sosednikh sloev [Temperature field of substrate under molten droplet detected by temperature equalization of adjacent layers]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2010. V. 53. No. 12-2. Pp. 195–199. (rus)
8. Kuznetsov G.V., Alekseenko N.N., Nemova T.N. Steel destruction under the action of high-temperature heterogeneous streams with a significant concentration of the particles. *Inorganic Materials: Applied Research Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2000. No. 5. Pp. 79–86.
9. Zharova I.K., Kuznetsov G.V., Maslov E.A. Termomekhanicheskoe razrushenie betonnoi plasty pod deystviem vysokotemperaturnoi geterogennoi strui [Thermomechanical destruction of concrete plate under high-temperature heterogeneous flow]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2006. No. 6. Pp. 61–68. (rus)
10. Bukatyi V.I., Perfil'ev V.O., Sharaukhov N.N. Issledovanie tsvetovym pirometrom dinamiki temperatury mramora i granita pri vozdeystvii moshchnym lazernym izlucheniem [Color pyrometer measurements of temperature dynamics of marble and granite exposed to powerful laser radiation]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2005. No. 1 (35). Pp. 93–96. (rus)

11. Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G. Razrabotka plazmennyykh tekhnologii dlya stroiindustrii [Development of plasma technologies for construction industry]. Aktual'nye problemy sovremennosti. 2017. No. 1 (15). Pp. 150–154. (rus)
12. Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. Protessy plavleniya silikatov v plazmokhimicheskom reaktore [Silicate melting processes in plasma chemical reactor]. Byulleten' nauki i praktiki: elektronnyi zhurnal. 2017. No. 2 (15). Pp. 59–62. (rus)
13. Erokhin B.T. Teoriya vnutrikamernykh protsessov i proektirovanie RDTT [Intra-compartment process theory and design of RDTT]. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 560 p. (rus)
14. Poznyak I.M., Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Safronov V.M., Zhitlukhin A.M., Kovalenko D.V. Eroziya metallov pri vozdествii intensivnykh potokov plazmy [Erosion of metals under intensive plasma flows]. Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser.: Termoyadernyi sintez. 2012. No. 4. Pp. 23–33. (rus)
15. Petrograficheskii kodeks Rossii [Petrographic Code of Russia]. St.-Peterburg: VSEGEI, 2008. P. 144. (rus)
16. Tumanov A. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii [Concrete and reinforced concrete structures]. Moscow: Palmarium Academic Publishing, 2015. 104 p. (rus)
17. Semerikov I.S., Gerasimova E.S. Fizicheskaya khimiya stroitel'nykh materialov [Physical chemistry of building materials]. 2nd ed., Moscow: Flinta, 2017. 204 p. (rus)

Сведения об авторах

Немова Татьяна Николаевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf_tgs@tsuab.ru

Рекунов Виталий Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf_tgs@tsuab.ru

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

Authors Details

Tat'yana N. Nemova, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia kaf_tgs@tsuab.ru

Vitalii S. Rekunov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia kaf_tgs@tsuab.ru

Nikolai A. Tsvetkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia nac.tsuab@yandex.ru

УДК 691.544

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-133-139

*Е.Е. САБИТОВ, Д.С. ДЮСЕМБИНОВ, Д.О. БАЗАРБАЕВ,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИИ БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

В статье рассмотрены вопросы улучшения качества ячеистого бетона путем применения ряда технологических процессов, позволяющих значительно улучшить потенциал используемых компонентов и при этом получить материал с высокими качественными показателями.

Проведены исследования композиционного газобетона с улучшенными физико-механическими свойствами. Для получения высоких показателей качества в технологии применяли роторно-пульсационный аппарат, который, создавая высокочастотные колебания, сопровождающиеся кавитацией, обеспечил получение качественной эмульсии полимерного компонента и алюминиевой пудры. За счет качественного омыления газообразователь равномерно распределился по структуре раствора и вступил в реакцию с цементным вяжущим, создав равномерное поровое пространство. А полимерный компонент, обволакивая пору, обеспечил гидрофобность материала и усилил его прочность.

Ключевые слова: газобетон; модификатор; полимерный компонент; морозостойкость; теплоизоляция; эмульсия; диспергатор.

Для цитирования: Сабитов Е.Е., Дюсембинов Д.С., Базарбаев Д.О. Исследование свойств композиции бетона с использованием полимерной эмульсии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 133–139.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-133-139

*E.E. SABITOV, D.S. DUSEMBINOV, D.O. BAZARBAYEV,
L.N. Gumilyov Eurasian National University*

CONCRETE COMPOSITION PROPERTIES MODIFIED BY POLYMER EMULSION

The paper deals with the quality of gas concrete by using a number of process technologies that can significantly improve the potential of the added components. The proposed technology for composite gas concrete production improves its physical-and-mechanical properties due to the use of a rotary-pulsation apparatus, which creates high-frequency vibrations accompanied by cavitation and produced a high-quality polymer emulsion and the aluminum powder. Due to high-quality saponification, the gasifier evenly distributes in the concrete paste structure and reacts with the cement binder, thereby creating a uniform pore space. And the polymer emulsion envelopes pores and improves the material hydrophobicity and strength.

Keywords: gas concrete; modifier; polymer emulsion; frost resistance; thermal insulation; powder dispenser.

For citation: Sabitov E.E., Dusembinov D.S., Bazarbayev D.O. Issledovanie svoystv kompozitsii betona s ispol'zovaniem polimernoi emul'sii [Concrete composition properties modified by polymer emulsion]. Vestnik Tomskogo gosudarstven-

nogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 133–139.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-133-139

В современных условиях развития строительства в Казахстане на фоне быстро развивающихся технологий ставится вопрос о внедрении новых перспективных технологий, в основе которых предполагается широкое использование местных сырьевых ресурсов и новых технологических приемов с целью получения высокоэффективных материалов.

Следовательно, вопрос обоснования и разработки экологической и безопасной технологии производства композиционных газобетонных изделий является актуальным.

Цель работы: исследование полимерной эмульсии для получения композиционного ячеистого бетона путем диспергирования компонентов. Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен научно-технический анализ актуальности разработанной технологии;
- определены методы получения эффективной полимерной эмульсии;
- разработана технология производства модификаторов для композиционного ячеистого бетона;
- обосновано применение разработанной эффективной полимерной эмульсии при производстве композиционного ячеистого бетона.

Методы исследования

Для определения эффективности добавок-модификаторов были проведены испытания прочности на сжатие (ГОСТ 10180–2012), водопоглощение по массе (ГОСТ 12730.3–78), теплопроводность (ГОСТ 7076–99). Были применены также методики, разработанные ведущими научно-исследовательскими институтами и университетами России и Казахстана – НИИЖБом, МГСУ, ВНИИжелезобетоном, НИИцементом, а также НИИСтромпроектом (г. Алматы) и др. [1–7].

Вопросы применения полимерного вяжущего в производстве композиционных ячеистых бетонов являются новым направлением и недостаточно хорошо изучены.

При решении проблемы эффективного совмещения полимерного компонента (ПВА), газообразователя (алюминиевой пудры) с минеральным вяжущим были учтены ряд вопросов взаимодействия водорастворимого полимера, алюминиевой пудры и цементного вяжущего.

На качество приготовленной эмульсии могут оказывать влияние способ диспергирования (эмульгирования) и температурный режим. Температурный режим был определен от 55 °С. Такая температура позволяет полимеру ПВА эффективно снять парафиновую пленку с поверхности алюминиевой пудры [8, 9].

В качестве диспергатора применяли роторно-пульсационный аппарат (РПА) представленный на рис. 1. Особенности работы аппаратов типа РПА изучены и апробированы [8, 9].

Основными факторами, которые определяют процесс эмульгирования в диспергаторе типа РПА, являются давление (0,5–1,0 МПа) и центробежное

воздействие (частота вращения ротора ~1200 об/мин). Эти факторы обуславливают возникновение в роторно-пульсационном аппарате высокочастотных колебаний, сопровождающихся кавитацией и гидродинамическими процессами, и тем самым позволяют получить качественную эмульсию [8, 9].



Рис. 1. Роторно-пульсационный аппарат РПА

Производство качественной эмульсии из водорастворимого полимера, воды и алюминиевой пудры для композиционного газобетона представлено на рис. 2.



Рис. 2. Схема получения качественной эмульсии полимера ПВА к производству композиционного газобетона

Согласно схеме приготовления полимерной эмульсии (рис. 2), на первом этапе алюминиевую пудру необходимо перемешать с полимерным компонентом, после чего на втором этапе совместно с водой провести через РПА. Данный процесс обеспечивает получение качественной полимерной эмульсии и высокий уровень омыления алюминиевой пудры. Также важно учитывать температуру воды, которая должна быть не ниже 55 °С, что обеспечит эффек-

тивное смешивание всех компонентов. Необходимо учитывать и количество всех компонентов при изготовлении эмульсии. Основной целью является:

1) получение легкорастворимой эмульсии полимера ПВА в воде затворения цементного вяжущего;

2) омыление поверхности алюминиевой пудры, которое позволяет улучшить контактную зону с цементным вяжущим и максимально вступить в химическую реакцию.

На основе проведенных исследований нами была разработана полимерная эмульсия для получения композиционного газобетона.

Принятый состав полимерной эмульсии и схема ее приготовления приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Состав полимерной эмульсии

Компоненты	Содержание, %
Водорастворимый полимер ПВА	40
Вода	20
Алюминиевая пудра	40

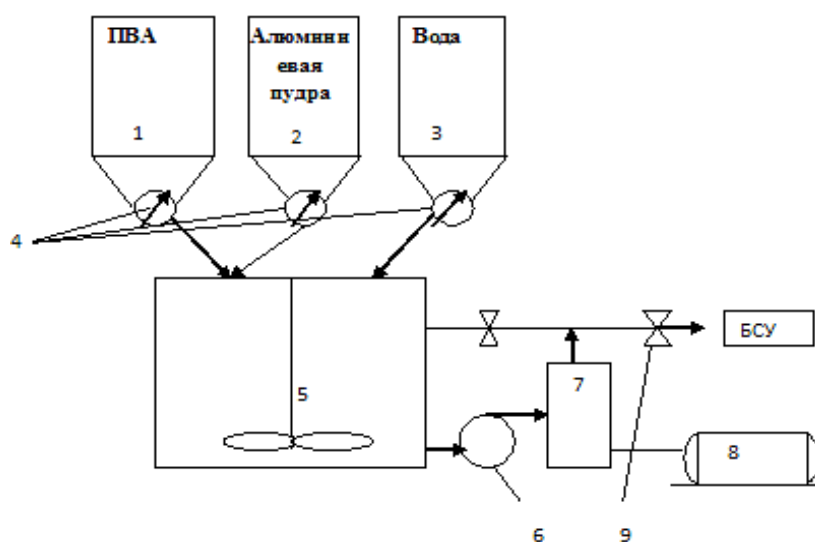


Рис. 3. Технологический процесс приготовления эмульсии:

1–3 – термообогреваемые бункеры ПВА, алюминиевой пудры и воды; 4 – дозаторы; 5 – термообогреваемый смеситель; 6 – насос; 7 – РПА; 8 – электродвигатель; 9 – вентиль

Приготовление эффективной эмульсии осуществляли в соответствии с рекомендациями различных ученых [9].

В бетоносмесительном цехе эффективную эмульсию, для омыления, совмещают с газообразователем (2). В данном случае полимерный компонент (1), помимо роли второго вяжущего вещества, выполняет функции

«омылителя», омылая зерна алюминиевой пудры и нейтрализуя гидрофобные свойства парафиновой пленки на зернах газообразователя. Применение роторно-пульсационного аппарата (7) усиливает эффект омыления газообразователя за счет высокочастотных колебаний, сопровождающихся кавитацией, способствующих усилению процесса снятия парафиновой пленки с поверхности алюминиевой пудры.

При производстве композиционного газобетона выполняются следующие операции. В смеситель загружается цементное вяжущее, мелкий заполнитель и тщательно перемешивается с добавлением воды В/Ц 0,45 в течение 5–7 мин, после чего добавляется эффективная полимерная эмульсия. Полученная смесь распределяется по формам до определенного уровня в зависимости от проектируемой плотности изделия.

Композиционный газобетон, полученный на основе полимерной эмульсии, имеет ряд преимуществ:

1. При производстве газобетонных изделий исключается пыление алюминиевой пудры, влияющие на здоровье персонала завода-изготовителя.
2. Увеличивается количество выделяемого газа от химической реакции с цементным вяжущим, что обеспечивает максимальную эффективность алюминиевой пудры.
3. Полимерный компонент позволяет равномерно распределить алюминиевую пудру по всей структуре газобетонного раствора.

На рис. 4 представлена схема распределения компонентов композиционного газобетона.

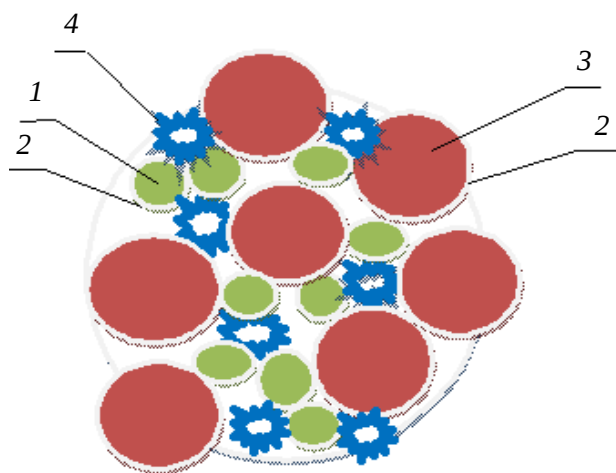


Рис. 4. Схема распределения компонентов композиционного газобетона с применением эффективной эмульсии полимера и газообразователя:

1 – частицы цементного вяжущего; 2 – полимерное вяжущее; 3 – песок; 4 – алюминиевая пудра

На рис. 4 видно, что полимерный компонент (2) обволакивает поверхность цементного вяжущего (1) и песка (3), создавая гидрофобную оболочку поровой структуры, обеспечивая тем самым низкие показатели водопоглоще-

ния, теплопроводности, увеличение прочности и морозостойкости. Омыленная поверхность алюминиевой пудры (4) эффективно вступает в контакт с частицами цементного вяжущего, образуя качественную поровую структуру. Результаты исследования физико-механических свойств композиционного газобетона представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Качественные показатели композиционного газобетона
средней плотностью 600 кг/м³**

Газобетон	Предел прочности на сжатие $R_{сж}$, МПа	Водопоглощение, %	Коэффициент теплопроводности λ , ккал/ч·м ² ·°С при 20 °С
Композиционный	4,5	12	0,11
Традиционный	3	30,5	0,14

Представленные результаты табл. 2 свидетельствуют о том, что композиционный газобетон по прочности превышает традиционный на 33 %, водопоглощение ниже традиционного на 59 % и теплопроводность ниже традиционной на 27 %, что подтверждает эффективность предлагаемой технологии.

Выводы

Установлено, что совмещение газообразователя и полимерного компонента в роторно-пульсационном аппарате РПА способствует снятию с поверхности алюминиевой пудры парафиновой пленки. Помимо омыливающей способности полимерного компонента и температуры совмещения с водой, дополнительно на поверхность парафиновой пленки воздействуют высокочастотные колебания, сопровождающиеся кавитацией, что также способствует эффективному снятию пленки. Данные процессы значительно улучшают газообразующую способность алюминиевой пудры, а полимерный компонент, обволакивая структуру поры, обеспечивает гидрофобные свойства газобетону.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. Москва : АСВ, 2011. 501 с.
2. Ткач Е.В., Рахимова Г.М., Серова Р.Ф., Ткач С.А. Получение эффективного модифицированного газобетона с использованием отходов промышленности и вторичного сырья // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 8-2. С. 41–46.
3. Миккульский В.Г., Сахаров Г.П., Козлов В.В. Строительные материалы. Москва : АСВ, 2011. 520 с.
4. Соловьев В.И. Бетоны с гидрофобизирующими добавками. Алматы : Наука, 1990. 112 с.
5. Соловьев В.И., Ергешев Р.Б. Эффективные модифицированные бетоны. Алматы : КазГосИНТИ, 2000. 285 с.
6. Соловьев В.И., Серова Р.Ф., Ткач С.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // Фундаментальные исследования. 2014. № 8 (часть 3). С. 590–595.
7. Семенов В.С., Ткач Е.В., Ткач С.А. Повышение гидрофизических свойств газобетона с использованием отходов промышленности // Научное обозрение. 2015. № 14. С. 194–196.

8. Ткач Е.В., Ткач С.А., Серова Р.Ф., Стасилович Е.А. Получение модифицированных газобетонных изделий на основе отходов промышленности и вторичного сырья // Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). 2015. № 1–2. С. 83–88.
9. Tkach E.V., Semenov V.C., Tkach S.A., Rozovskaya T.A. Highly effective water-repellent concrete with improved physical and technical properties // Procedia Engineering 24th Sep. XXIV R-S-P Seminar – Theoretical Foundation of Civil Engineering. 2015. P. 763–769.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: ASV, 2011. 501 p. (rus)
2. Tkach E.V., Rakhimova G.M., Serova R.F., Tkach S.A. Polucheniye effektivnogo modifitsirovannogo gazobetona s ispol'zovaniyem otkhodov promyshlennosti i vtorichnogo syr'ya [Modified gas concrete production based on industrial wastes and recyclable materials]. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2015. No. 8-2. Pp. 41–46. (rus).
3. Mikul'skiy V.G., Sakharov G.P., Kozlov V.V. Stroitel'nyye materialy [Construction materials] Moscow: ASV, 2011. 520 p. (rus)
4. Solov'yev V.I. Betony s gidrofobiziruyushchimi dobavkami [Concrete with water repellents]. Almaty: Nauka, 1990. 112 p. (rus)
5. Solov'yev V.I., Yergeshev R.B. Effektivnyye modifitsirovannyye betony [Effective concrete modification]. Almaty: KazGosINTI, 2000. 285 p. (rus)
6. Solov'yev V.I., Serova R.F., Tkach S.A. Issledovaniye poristosti tsementnogo kamnya, modifitsirovannogo kompleksnymi organomineral'nymi modifikatorami [Porosity of cement paste with complex organic-mineral modifiers]. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2014. No. 8. Pp. 590–595. (rus)
7. Semenov V.S., Tkach E.V., Tkach S.A. Povysheniye gidrofizicheskikh svoystv gazobetona s ispol'zovaniyem otkhodov promyshlennosti [Hydrophysical properties improvement of gas concrete using industrial waste]. *Nauchnoye obozreniye*. 2015. No. 14. Pp. 194–196. (rus)
8. Tkach E.V., Tkach S.A., Serova R.F., Stasilovich E.A. Polucheniye modifitsirovannykh gazobetonnykh izdeliy na osnove otkhodov promyshlennosti i vtorichnogo syr'ya [Gas concrete products modified by industrial wastes and recyclable materials]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 1–2. Pp. 83–88. (rus)
9. Tkach E.V., Semenov V.C., Tkach S.A., Rozovskaya T.A. Highly effective water-repellent concrete with improved physical and technical properties. *Procedia Engineering 24th Sep. XXIV R-S-P Seminar 'Theoretical Foundation of Civil Engineering'*. 2015. Pp. 763–769.

Сведения об авторах

Сабитов Ерлан Енжислович, канд. техн. наук, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2.

Дюсембинов Думан Серикович, канд. техн. наук, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2.

Базарбаев Данияр Омарович, канд. техн. наук, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2.

Authors Details

Erlan E. Sabitov, PhD, A/Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2, Satpaev Str., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan.

Duman S. Dusembinov, PhD, A/Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2, Satpaev Str., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan.

Daniyar O. Bazarbayev, PhD, A/Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2, Satpaev Str., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan..

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 621.317.7

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-140-151

*А.Н. БЕЛОУС, М.В. ОВЕРЧЕНКО, О.Е. БЕЛОУС,
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В современной строительной практике более половины эксплуатируемых зданий нуждаются в термомодернизации. Однако для подбора эффективной системы утепления необходимо знать фактические теплотехнические характеристики конструкций и параметры внутренней среды здания. В статье проведен анализ методик и существующего оборудования для определения теплотехнических показателей наружных ограждений. Определены преимущества и недостатки основных приборов, рекомендуемых нормативными документами для проведения натурных исследований. На основе полученных данных разработан теплотехнический комплекс для проведения натурных исследований тепловлажностного состояния ограждающих конструкций и микроклимата помещений здания. Усовершенствование программного обеспечения совместно с приборами и считывающим устройством Arduino позволяет осуществлять мониторинг как при стационарном, так и при нестационарном тепловом режиме наружных ограждающих конструкций и параметрах микроклимата помещений в натурных условиях.

Ключевые слова: приборы; оборудование; теплотехнические показатели; измерительный комплекс; тепловлажностное состояние.

Для цитирования: Белоус А.Н., Оверченко М.В., Белоус О.Е. Разработка теплотехнического измерительного комплекса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 140–151.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-140-151

*A.N. BELOUS, M.V. OVERCHENKO, O.E. BELOUS,
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*

PORTABLE HEAT METERING SYSTEM DESIGN

In modern construction practice, more than half of buildings in operation require modernization of thermal insulation. However, in order to select an effective insulation system, it is necessary to know the actual thermal and technical characteristics of structures and parameters of the building internal environment. The paper analyzes methods and equipment for evaluation of the thermal performance of outdoor enclosures. The advantages and disadvantages of

the main devices recommended by the regulatory documents for field research are shown. According to the data obtained, a heat engineering complex is developed for conducting field studies of heat and humidity of wall structures and microclimate of building premises. Software improvement together with Arduino reader device allow monitoring both at stationary and non-stationary thermal conditions of external enclosures and indoor climate parameters in field conditions.

Keywords: devices; equipment; heat engineering parameters; metering system; heat and humidity condition.

For citation: Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Perenosnoi teploekhnicheskii izmeritel'nyi kompleks [Portable heat metering system design]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 140–151.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-140-151

Введение

Изменение нормативной документации и повышение требований, предъявляемых к наружным ограждающим конструкциям как проектируемых, так и эксплуатируемых зданий, обусловлены проблемами дефицита энергетических ресурсов и ростом их стоимости. Стремление к экономии энергии является одной из первостепенных задач в современной практике строительства и энергетической политике государства. В директиве 2010/31/EU [1] энергопотребление зданий оценивается на уровне 41 % от общего расхода энергии, из которого большая часть приходится на отопление и вентиляцию [2]. Исходя из этого наиболее нерациональное использование энергии происходит в общественных зданиях с непостоянным пребыванием людей, в которых значительную часть суток (от 12 до 16 ч) людей нет. Однако пребывание большого количества людей в таких зданиях в рабочее время приводит к значительному росту показателей влажности воздуха и колебаниям температуры, что может оказывать негативное влияние на состояние наружных ограждающих конструкций.

Чрезмерные теплопотери через наружную оболочку зданий, построенных по старым строительным нормам, приводят к промерзанию конструкций в холодный период года, смещению температуры точки росы на внутренней поверхности наружных стен, выпадению конденсата и, как следствие, возникновению плесневых грибов на поверхности наружных стен. Это обуславливает необходимость мониторинга состояния ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий [3]. В последнее время появилось большое количество новых приборов для оценки состояния наружных ограждающих конструкций зданий, однако условия работы, погрешность измерений и способы обработки данных для каждого из них различны и требуют дальнейшего изучения.

Исследование температурно-влажностного режима наружных ограждающих конструкций на примере жилых и общественных зданий описано в работах [4–7]. Авторами установлено, что выбор оптимального месторасположения утеплителя в конструкции наружных стен при термомодернизации зданий обеспечивает нормальный влажностный режим наружных ограждений, однако для этого необходимо производить натурные исследования.

В статьях зарубежных ученых также остро стоит вопрос о применении энергоэффективных технологий при строительстве и проектировании зданий. В работе [8] рассмотрена проблема снижения потребления энергии на различных этапах эксплуатации здания. В работе [9] произведен анализ факторов, влияющих на расход энергии в жилых помещениях (DEAP) с поправками на систему кондиционирования и вентиляции. Исследовано влияние изменяющихся погодных условий на энергетические характеристики здания. На примере трех типов помещений произведен анализ влияния 68 факторов на энергетические показатели здания (значение U-фактора для крыш, окон, стен и полов) в 12 различных регионах Европы. Работа [10] посвящена измерительной системе, основанной на инфракрасном (IR) и тепловизионном (ITT) методе оценки. Данная измерительная система оценивает температурные колебания в помещениях и условия комфорта в режиме реального времени. Инфракрасная камера, установленная на потолке, позволяет получать тепловое изображение, а последующая обработка – определять среднюю температуру поверхности, количество людей и наличие других источников тепла (например, компьютера) с помощью алгоритмов обнаружения. Модель с сосредоточенными параметрами помещения, разработанная в среде Matlab/Simulink, получает в качестве входных данных информацию, извлеченную из обработки изображений, для вычисления скорости теплообмена, температуры воздуха и теплового комфорта (PMV) в помещении. Мгновенная информация может отображаться для пользователей или в конечном итоге использоваться для автоматического управления системами вентиляции и кондиционирования воздуха. Система основана на индивидуальной адаптации недорогой ИК-системы наблюдения с выделенной радиометрической калибровкой. Экспериментальные результаты, полученные автором, показывают средние абсолютные расхождения порядка 0,4 °C между расчетной и измеренной температурой воздуха в течение суток.

Целью данного исследования является выполнение анализа существующего оборудования и методик определения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций и тепловлажностного состояния воздуха в помещении в натурных условиях. Основываясь на данных, полученных в ходе исследования, необходимо разработать лабораторную установку для производства натурных исследований.

Материалы и методы

Разработка и проведение мероприятий по термомодернизации эксплуатируемых зданий достаточно проблематична без оценки теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций. Одним из важных факторов является сопротивление теплопередаче R , м²·К/Вт. Для зданий, эксплуатируемых не одно десятилетие, при определении фактического сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции необходимо учитывать динамику колебания тепловых потоков и температур на поверхности ограждения. От температурного режима помещения и влажности внутреннего воздуха зависит еще один показатель – температура точки росы, при которой плоскость конденсации влаги может возникать на внутренней поверхности наружных ограждений.

При несоответствии показателей минимальной температуры внутренней поверхности конструкции $t_{в\ min}$, °С, нормативным требованиям и превышении показателей влажности внутреннего воздуха ϕ , %, происходит изменение влажностного состояния ограждающей конструкции, что негативно сказывается на ее эксплуатационных и прочностных свойствах.

Натурные исследования сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий, согласно требованиям ДСТУ Б В.2.6-101:2010 «Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций» и ГОСТ Р 54853–2011 «Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера», необходимо производить в осенне-зимний, зимний или зимне-весенний период года. Постоянное значение температуры воздуха в помещении должно поддерживаться системой отопления или регулирования температуры и влажности воздуха. Комплект средств измерения теплотехнических характеристик и вспомогательных параметров ограждающей конструкции должен содержать:

– первичные преобразователи температуры: термоэлектрические преобразователи температуры по ГОСТ 6616 (рис. 1), например термопары, изготовленные из термоэлектродной проволоки по ГОСТ 1790; термопреобразователи сопротивления по ГОСТ 6651 (рис. 2), а также электронные цифровые измерители температуры по действующей научно-технической документации – для измерения фактических значений температуры поверхностей ограждающих конструкций и воздуха вблизи них. Чувствительный элемент термопары для контактного измерения температуры конструктивно должен быть выполнен или в виде «пятачка» (диаметром не более 6 мм), или в виде «ленты» шириной не более 2 мм. Чувствительный элемент термопары для измерения температуры воздуха должен быть защищен от прямого воздействия теплового излучения;

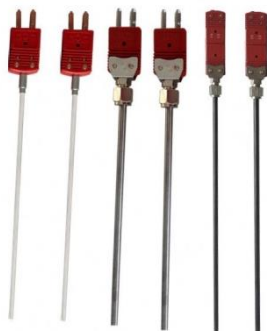


Рис. 1. Медь-константановые термопары типа Т



Рис. 2. Первичный преобразователь сопротивления

– переносной цифровой пирометр или термометр для бесконтактных измерений фактических значений поверхностной температуры в труднодоступных местах;

– первичные термоэлектрические преобразователи теплового потока по ГОСТ 6616 – для длительных (до нескольких суток) непрерывных измерений

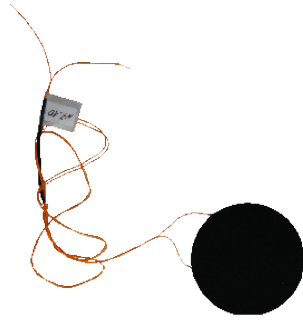


Рис. 3. Датчик теплового потока ДТП 0924

плотности теплового потока на обследуемых участках (рис. 3). При выборе преобразователя теплового потока следует руководствоваться рекомендациями ГОСТ 25380. Допускается применение переносных цифровых измерителей теплового потока, например, типа ИТП (для оперативных одновременных контактных измерений поверхностной плотности теплового потока и (или) температуры);

– средства для измерения влажности материалов ограждающих конструкций;

– средства измерения сигналов первичных преобразователей, которые позволяют проводить непрерывные длительные измерения и сохранять

измерительную информацию для дальнейшей обработки. Например, специализированное информационно-измерительное устройство по ГОСТ 25380 для одновременного непрерывного многодневного приема измерительных сигналов и сохранения этой измерительной информации в памяти прибора с привязкой к текущему времени.

Система компьютеризации процесса испытания ограждающей конструкции, согласно ДСТУ Б В.2.6-101:2010, должна включать в себя ноутбук для сбора и хранения измерительной информации от измерительных первичных преобразователей или информационно-измерительного устройства и другой многоканальной измерительной системы и последующей передачи этой информации в стационарный ПК с соответствующим сервисным оборудованием для приема в лабораторных условиях, и ее обработки по специальным программам для вычисления сопротивления теплопередаче или приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции и, по необходимости, трансмиссионных тепловых потерь; специализированное программное обеспечение, которое должно содержать пакет программ по обработке измерительной информации.

В ходе исследования определяют температуру наружной t_n и внутренней t_v поверхности ограждающей конструкции, температуру окружающей среды внутри помещения $t_{вн}$ и снаружи $t_{н}$. Затем по имеющимся данным определяется температурный перепад $\Delta T_{пр}$. По результатам измерения температур и плотности теплового потока рассчитывается фактическое значение плотности теплового потока $q_{факт}$. На основании полученных данных определяется приведенное сопротивление теплопередаче конструкции $R_{Σпр}$ и линейный коэффициент теплопередачи U для участков с теплопроводными включениями.

Для измерения температур поверхности ограждающей конструкции и параметров окружающей среды используются датчики температуры, измерители теплового потока, бесконтактные средства измерения температуры. Существует несколько основных типов контактных датчиков, применяемых для измерения температуры ограждающей конструкции: терморезистивные датчики, полупроводниковые датчики и термопары. Сравнительный анализ приборов для измерения тепловых характеристик наружных ограждающих конструкций приведен ниже.

Контактные средства измерения**1. Терморезистивные датчики.**

Преимущества: высокая чувствительность; малая инерционность; высокое сопротивление; малый размер; низкая стоимость; высокая стабильность.

Недостатки: нелинейная характеристика; рабочий диапазон температур от -60 до $+300$ °С; взаимозаменяемость в узком диапазоне температур; необходим источник тока.

Параметр работы: электрическое сопротивление.

2. Полупроводниковые датчики.

Преимущества: хорошая линейность характеристики; высокая стабильность; высокая взаимозаменяемость в широком диапазоне температур.

Недостатки: ограниченный температурный диапазон; относительно большая инерционность; необходимость трех- или четырехпроводной схемы включения; чувствительность к ударам и вибрациям; необходим источник тока; высокая стоимость.

Параметр работы: электрическое сопротивление.

3. Термопары.

Преимущества: широкий температурный диапазон; простота производства; низкая стоимость; износоустойчивость; не требует дополнительного источника энергии.

Недостатки: нелинейная характеристика; относительно низкая стабильность; измерение низких ЭДС осложняется электромагнитными шумами и наводками; необходима компенсация холодных спаев.

Параметр работы: электрическое напряжение.

4. Переносные измерители плотности теплового потока (ИПП).

Преимущества: мобильность прибора; высокая скорость считывания данных; возможность подключения до 8 различных зондов.

Недостатки: ограниченный температурный диапазон от -30 до $+50$ °С и относительная влажность воздуха не более 85 %; для точных измерений при перепадах температур прибор должен находиться в стационарных условиях не менее 2 ч.

Параметр работы: измерение перепада температур на «вспомогательной стенке» с помощью ленточной термопары.

Бесконтактные средства измерения – тепловизоры и инфракрасные пирометры

Преимущества: всесезонность и независимость от метеоусловий; применимость в рабочих режимах эксплуатации; высокая информативность (по всей поверхности объекта) и наглядность; безопасность, бесконтактность и дистанционность; неограниченность перечня контролируемых объектов.

Недостатки: высокая стоимость и хрупкость приборов; погрешность ± 2 % или меньшая точность; невозможность измерения внутренних температур объекта; измеряемый диапазон температур ограничен и зависит от марки и типа прибора.

Параметр работы: электромагнитные волны.

Датчики по высоте помещения и на поверхности ограждающей конструкции должны быть расположены на основании требований ГОСТ Р 54853–2011 и ДСТУ Б В.2.6-101:2010. Схема расположения датчиков представлена на рис. 4.

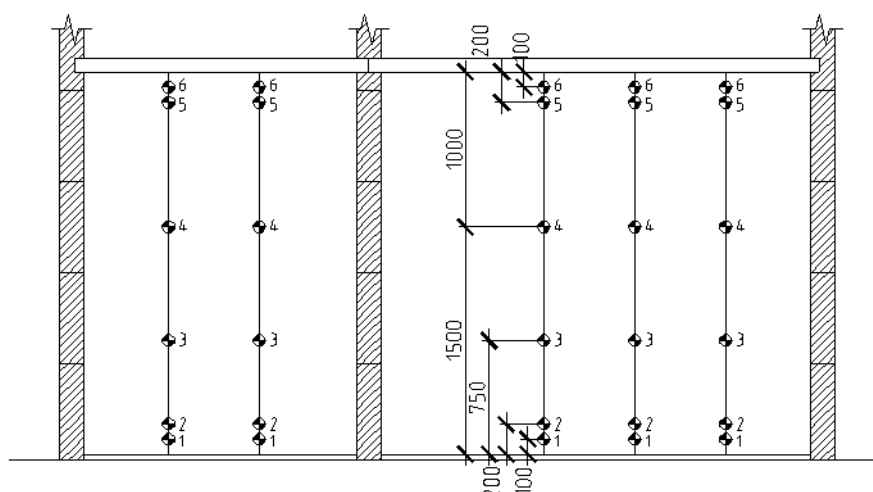


Рис. 4. Схема расположения датчиков согласно нормативным требованиям

Результаты

Для проведения необходимых измерений было решено собрать установку для подключения измерительных датчиков, сбора информации и вывода/сохранения её на персональный компьютер. Принципиальная схема подключения датчиков приведена на рис. 5. При выборе модели АЦП было принято решение использовать оборудование фирмы Arduino. Программная часть состоит из бесплатной программной оболочки (IDE) для написания программ, их компиляции и программирования аппаратуры. Аппаратная часть представляет собой набор смонтированных печатных плат, которые можно приобрести как у официальных так и у сторонних производителей. Полностью открытая архитектура системы позволяет свободно копировать или дополнять линейку продукции. Arduino может использоваться как для создания автономных объектов автоматизации, так и подключаться к программному обеспечению на компьютере через стандартные проводные и беспроводные интерфейсы. Подключение осуществлялось по USB каналу персонального компьютера.

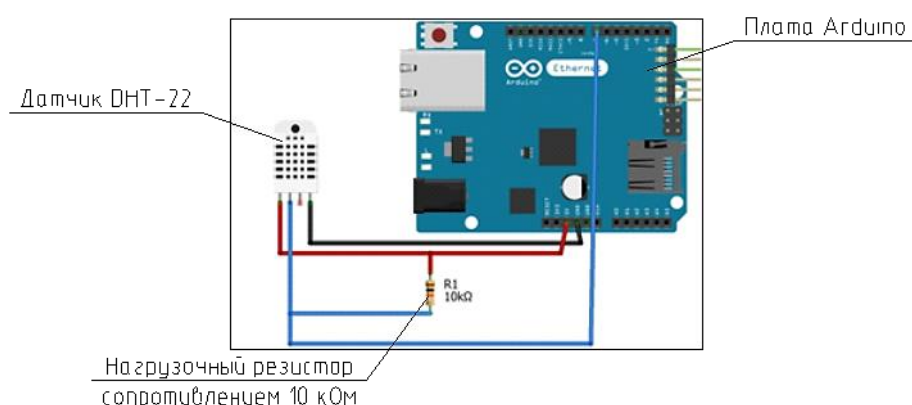


Рис. 5. Принципиальная схема подключения датчика DHT-22

Платформа Arduino UNO R3 имеет 14 цифровых пинов входа/выхода, 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем и разъем ICSP. Пины используются для подключения внешних устройств, могут работать как в режиме входа, так и в режиме выхода. Каждый вывод имеет нагрузочный резистор 10–50 кОм и может пропускать до 40 мА. Платформа позволяет одновременно подключать до 12 цифровых датчиков измерения температуры и влажности DHT-22 (рис. 6). Каждый датчик подключен к платформе экранированным кабелем длиной 6 м, что является оптимальной длиной, при которой возможно свести к минимуму влияние внутренних помех при проведении измерений и снизить влияние электромагнитного излучения.

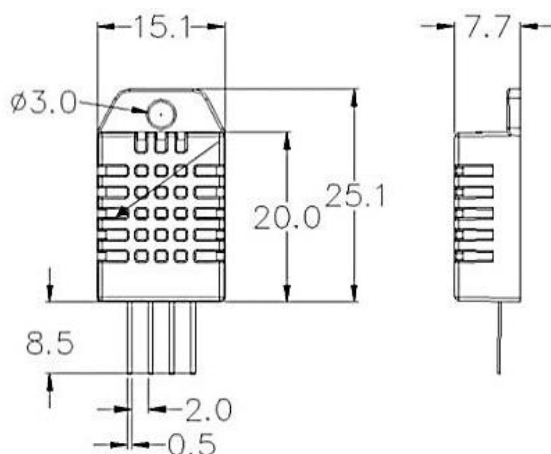


Рис. 6. Общий вид датчика DHT-22

Технические параметры датчика: напряжение питания: 3,3–5 В; выходной сигнал: цифровой; чувствительный элемент: полимерный конденсатор; диапазон измерения влажности: 0–100 %, погрешность ± 2 %; диапазон измерения температуры: $-40 \dots +80$ °C, погрешность $\pm 0,5$ °C; задержка измерения 2 с.

Датчики состоят из NTC-термистора, чувствительного емкостного датчика и 8-битного чипа, преобразующего аналоговый сигнал с датчика в цифровой на выходе. Все показания передаются по цифровой информационной шине. Калибровка каждого датчика происходит при производстве в калибровочной камере, а поправочный коэффициент сохраняется в памяти и вызывается в момент считывания данных. Высокая точность передачи данных сохраняется при удалении датчика от устройства считывания информации на расстояние до 20 м.

Небольшие размеры датчиков и возможность их удаления от регистрирующей платформы позволяют снимать показания непосредственно на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции, в вентиляционных каналах, а также в толще конструкции. Это позволит фиксировать температуру на границах слоев наружных ограждений.

Общий вид теплотехнического комплекса для определения тепловлажностного режима наружных ограждений и микроклимата помещения пред-

ставлен на рис. 7. Расположение датчиков на поверхности исследуемой конструкции может изменяться в зависимости от программы исследования.

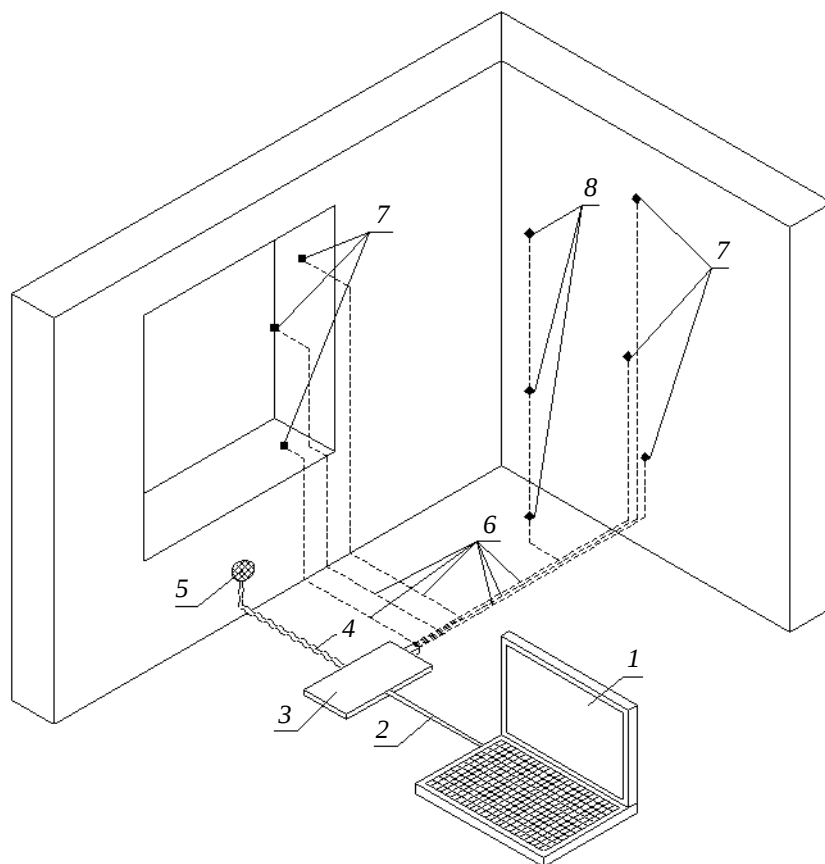


Рис. 7. Схема испытательного комплекса:

1 – устройство вывода информации (ноутбук); 2 – кабель питания считывающего устройства; 3 – считывающее устройство Arduino; 4 – экранированный кабель датчика теплового потока; 5 – датчик теплового потока; 6 – экранированный кабель; 7 – датчики DHT-22, расположенные на поверхности наружных ограждений; 8 – датчики DHT-22, расположенные по высоте помещения

Программное обеспечение считывающего устройства Arduino с открытым исходным кодом, что позволило изменять и дорабатывать исходную программу в части сбора и обработки информации, получаемой с датчиков, и конвертации полученных данных в табличном виде в формате *.txt. Данные из таблиц возможно в дальнейшем обрабатывать в более мощных программных комплексах, таких как MS Office, MatLab, имеющих широкие возможности в области работы с большими массивами данных.

Была написана программа, дополняющая стандартное программное обеспечение. Текст программы мониторинга и сохранения данных представлен на рис. 8.

```
void loop()
{
    delay(2000);
    float h = dht.readHumidity(); //Считываем влажность
    float t = dht.readTemperature(); //Считываем температуру (в градусах Цельсия)
    //Устанавливаем курсор в 1 столбец 1й строки (выводим влажность)
    //Нумерация идёт с нуля, первым аргументом идёт номер столбца
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Humidity: ");
    lcd.print(h);
    lcd.print(" %\t");
    //Устанавливаем курсор 1 столбец 2й строки (выводим температуру)
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Temperature:");
    lcd.print(t);
    lcd.print(" *C ");
    //Возвращаем курсор на 1 столбец 1й строки
    lcd.setCursor(0, 0);
}
```

Рис. 8. Текст программы мониторинга и сбора данных (пунктуация соблюдена согласно требованиям программного обеспечения)

Заключение

На основании анализа приборов и оборудования, применяемого по рекомендациям нормативных документов для определения теплотехнических показателей наружных ограждающих конструкций, определено оборудование для дальнейшей разработки лабораторной установки: датчик DHT-22 и считывающее устройство Arduino. Предложенный вариант теплотехнического комплекса имеет оптимальное соотношение показателей «цена-качество», который удовлетворяет действующим требованиям по измерению теплотехнических параметров ограждающих конструкций. Разработанный программный комплекс позволяет осуществлять мониторинг как при стационарном, так и при нестационарном тепловом режиме наружных ограждающих конструкций и параметрах микроклимата помещений в натурных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
2. Шкаровский А.Л. Исследование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций при нестационарном управлении внутренним климатом // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 170–176.
3. Оверченко М.В. Влажностный режим наружных ограждающих конструкций общеобразовательных учреждений после термомодернизации зданий // X Международный молодежный форум «Образование, наука, производство». Белгород, 2018.
4. Борисюк А.О., Кутный Б.А. Влажностный режим утепленной несущей ограждающей конструкции при применении программного отпуска теплоты // Новые идеи нового века: Оптимизация строительных конструкций. Экологическая устойчивость, проблемы экономики, ресурсосбережения и безопасности населенных мест. 2014. Т. 3. С. 251–257.
5. Корниенко С.В. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилого здания при верификации метода расчета влаготеплопереноса в ограждающих конструк-

- циях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28 (47). С. 19–26.
6. Корниенко С.В. Оценка влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на теплозащиту зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 26 (45). С. 148–154.
 7. Гагарин В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2000. 48 с.
 8. Yiksek I., Karadayi T. Energy-Efficient Building Design in the Context of Building LifeCycle. 2017. URL: <https://www.intechopen.com/books/energy-efficient-buildings>
 9. Chari A., Xanthos S. Stochastic assessment of the energy performance of buildings // Energy Efficiency. July 2017. 10 (8).
 10. Revel G.M., Sabbatini E., Arnesalo M. Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment // Measurement Science and Technology. 2012. V. 23. № 3.

REFERENCES

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
2. Shkarovskii A.L. Issledovanie teplovlazhnostnogo sostoyaniya ograzhdayushchikh konstruktssii pri nestatsionarnom upravlenii vnutrennim klimatom [Thermal and humidity conditions of enclosing structures under non-stationary internal climate control]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No. 4 (63). Pp. 170–176. (rus)
3. Overchenko M.V. Vlazhnostnyi rezhim naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktssii obshcheobrazovatel'nykh uchrezhdenii posle termomodernizatsii zdaniy [Humidity regime of wall structures of general education institutions after thermal modernization of buildings]. In: X Mezhdunarodnyi molodezhnyi forum 'Obrazovanie, nauka, proizvodstvo' (Proc. 10th Int. Sci. Forum 'Education, Science, Production'). Belgorod, 2018. (rus)
4. Borisyyuk A.O., Kutnyi B.A. Vlazhnostnyi rezhim uteplennoi nesushchei ograzhdayushchei konstruktssii pri primenenii programmnoy otpuski teploty [Humidity regime of insulated load-bearing enclosing structure using heat release program]. In: Novye idei novogo veka: Optimizatsiya stroitel'nykh konstruktssii. Ekologicheskaya ustoichivost', problemy ekonomiki, resursosberezheniya i bezopasnosti naselennykh mest (Coll. Papers 'New Ideas of New Century') 2014. V. 3. Pp. 251–257. (rus)
5. Kornienko S.V. Naturnye issledovaniya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima zhilogo zdaniya pri verifikatsii metoda rascheta vlagoteploperenosa v ograzhdayushchikh konstruktssiyakh [Field research into temperature and humidity conditions of residential building at verification of calculation method for moisture-heat transfer in enclosing constructions]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2012. No. 28 (47). Pp. 19–26. (rus)
6. Kornienko S.V. Otsenka vliyaniya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima v kraevykh zonakh ograzhdayushchikh konstruktssii na teplozashchitu zdaniy [Temperature and humidity effect in edge zones of enclosing structures on heat protection of buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2012. No. 26 (45). Pp. 148–154. (rus)
7. Gagarin V.G. Teoriya sostoyaniya i perenosa vlagi v stroitel'nykh materialakh i teplozashchitnye svoystva ograzhdayushchikh konstruktssii zdaniy : avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk [Theory of condition and moisture transfer in building materials and thermal protection properties of building envelopes. DSc Abstract]. Moscow, 2000. 48 p. (rus)
8. Yiksek I., Karadayi T. Energy-efficient building design in the context of building lifecycle. 2017. Available: www.intechopen.com/books/energy-efficient-buildings
9. Chari A., Xanthos S. Stochastic assessment of the energy performance of buildings. *Energy Efficiency*. 2017. V. 8. No. 10.

10. Revel G.M., Sabbatini E., Arnesalo M. Development and experimental evaluation of a thermography measurement system for real-time monitoring of comfort and heat rate exchange in the built environment. *Measurement Science and Technology*. 2012. V. 23. No. 3.

Сведения об авторах

Белоус Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, us28@ya.ru

Оверченко Мира Викторовна, аспирант, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, miro4ka8@mail.ru

Белоус Ольга Евгениевна, аспирант, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, olga.belaus@yandex.ua

Authors Details

Aleksei N. Belous, PhD, A/Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, us28@ya.ru

Mira V. Overchenko, Research Assistant, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, miro4ka8@mail.ru

Ol'ga E. Belous, Research Assistant, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, olga.belaus@yandex.ua

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.33/.34.033(1-17)-047.37 DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163

*Е.И. ВЯЛКОВА¹, Е.С. ГЛУЩЕНКО¹, Т.С. ВЕЛИЖАНИНА¹,
Е.Ю. ОСИПОВА²,*

¹Тюменский индустриальный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД СЕВЕРНЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Значительная часть территории Российской Федерации находится в арктическом и субарктическом климатическом поясе, что обуславливает специфику проектирования, строительства и эксплуатации сетей и сооружений системы водоотведения в этих населенных пунктах.

На сегодняшний день большая часть малых населенных пунктов в этих регионах либо не оборудованы канализационными очистными сооружениями, либо действующие станции биологической очистки работают неудовлетворительно. В качестве альтернативы рассматривается вариант устройства физико-химической очистки, которая более устойчива к суровому климату и залповым сбросам стоков, чем биологическая очистка.

В статье представлены результаты исследования по полной замене блока биологической очистки на физико-химическую в составе канализационных очистных сооружений. В качестве основных ступеней очистки выбраны коагуляция, фильтрование на механических фильтрах, окисление с последующей двухступенчатой доочисткой на механических и сорбционных фильтрах.

В результате проведенного лабораторного эксперимента были достигнуты следующие эффекты снижения концентрации проблемных загрязнений: 90,8 % – по ХПК, 74 % – по аммонии, 82,5 % – по нитратам.

Ключевые слова: северные населенные пункты; сточные воды; физико-химическая очистка; биологическая очистка бытовых сточных вод; коагуляция; окисление; эффекты очистки сточных вод.

Для цитирования: Вялкова Е.И., Глущенко Е.С., Велижанина Т.С., Осипова Е.Ю. Анализ физико-химических методов очистки бытовых сточных вод северных населенных пунктов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 152–163.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163

E.I. VIALKOVA¹, E.S. GLUSHCHENKO¹, T.S. VELIZHANINA¹,
E.Y. OSIPOVA²,

¹Tyumen State Oil and Gas University

²Tomsk State University of Architecture and Building

ANALYSIS OF PHYSICOCHEMICAL WASTEWATER TREATMENT IN ARCTIC ZONES

The large part of the Russian Federation locates in arctic and subarctic climatic zones, which determine the specificity of design, construction and operation of sewage systems of these regions. Nowadays, the most part of small Arctic towns has no wastewater treatment facilities, while the available biological treatment facilities do not work properly. An alternative way is physicochemical treatment, which is more resistant to severe climate and volley wastewater discharge than biological treatment. The paper presents the research results of total change the biological into physicochemical treatment. The main stages of such a treatment include coagulation, filtration, oxidation and two-stage filtration (mechanical and absorption). The experiments show a 90.8% decrease in the concentration of chemical oxygen and a 74% and 82.5% decrease in nitrates and ammonium.

Keywords: Arctic zone; wastewater; physicochemical treatment; coagulation; oxidation; wastewater treatment.

For citation: Vialkova E.I., Glushchenko E.S., Velizhanina T.S., Osipova E.Y. Is-sledovanie fiziko-khimicheskikh metodov oчитki bytovykh stochnykh vod severnykh naselennykh punktov [Analysis of physicochemical wastewater treatment in Arctic zones]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 152–163. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163

Достаточно большая часть территории России находится в арктических (или приближенных к арктическим) условиях, в том числе и север Западной Сибири, где расположена Тюменская область – самая большая область в России. Суровые климатические условия, мерзлые подвижные грунты, болотистая местность создают серьезные проблемы при проектировании, строительстве и эксплуатации различных объектов. В Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах имеется более 100 небольших муниципальных образований, расположенных в отдалении от крупных центров, имеющих децентрализованную систему водоотведения. Хозяйственно-бытовые сточные воды накапливаются в септиках и периодически вывозятся и сливаются на рельеф или в водные объекты без всякой очистки. Такой подход отрицательно влияет на состояние окружающей природной среды.

Эксплуатация малогабаритных канализационных очистных сооружений в небольших поселениях северной климатической зоны весьма проблематична. Низкие температуры поступающих на сооружения стоков зимой (от +2 до +7 °С) существенно влияют на биохимические процессы очистки. Ситуация осложняется тем, что исходные стоки имеют повышенную концентрацию органических веществ по причине низкой нормы водоотведения на одного жителя (80–90 л/сут) и инфильтрации воды из негерметичных септиков в грунт в процессе накопления. Средняя эффективность действующих очистных сооружений существенно зависит от производительности станции и составляет в лучшем случае от 70 до 90 % [1].

В европейских странах большое внимание уделено проблеме функционирования малых канализационных очистных станций, комплексной оценке их работы и разработке государственных программ по их реконструкции [2–4]. Например, в северных поселениях Канады и Норвегии широкое распространение в качестве метода очистки сточных вод получили биопруды и биоплато, которые в экстремально холодных условиях работают в режиме периодического сброса стоков. Кроме того, биоплато могут выступать в качестве доочистки после аэробных биофильтров, что способствует снижению БПК на 96 %, азота на 60 %, фосфора на 90 % [5–7]. Ряд исследователей [8–12] в качестве альтернативного варианта биологической аэробной очистке предлагают использовать аэробные технологии или биоэлектрохимическое окисление. При этом дополнительно выделяется побочный продукт – биогаз, который можно использовать в качестве источника энергии. Среди биоэлектрохимических технологий для удаления органических веществ получили распространение микробные топливные и микробные электролизные элементы, при этом было достигнуто снижение показателя ХПК на 80 %. Еще одним вариантом обработки сточных вод являются блочно-модульные станции, например, в Швеции и Норвегии. В основе работы таких станций могут лежать как биохимические аэробные процессы (SBR-реактор, аэротенк, биофильтр), так и физико-химические процессы. Однако, согласно авторам [11, 12], часто выходные концентрации основных загрязнений не соответствуют заявленным и требуемым нормативным значениям.

Значительные исследования ведутся сегодня по разработкам эффективных физико-химических методов очистки сточных вод, которые более просты в эксплуатации в северном климате [13–22]. В качестве основных окислительных технологий можно выделить: озонирование + пероксид водорода (возможно в присутствии катализатора); электрохимические методы окисления (электрокоагуляция, электрофлотация); процесс Фентона; озонирование + ультрафиолетовое излучение.

Однако при реализации вышеуказанных методов не всегда удается достичь требуемого эффекта очистки хозяйственно-бытовых стоков по органическим загрязнениям. По опубликованным данным, практически во всех технологических схемах канализационных очистных сооружений (КОС), исключая биологические методы, возникают проблемы с ХПК и азотными группами. В большей степени физико-химические способы нашли применение для доочистки промышленных стоков с низким содержанием органики. В то же время данные методы имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционной биологической очисткой: хорошая восприимчивость к залповым сбросам стоков, более простая эксплуатация, эффективность при низких температурах воды.

В связи с вышесказанным целью данной работы является исследование эффективности физико-химических методов очистки бытовых сточных вод с последующей разработкой вариантов технологической схемы канализационных очистных сооружений, рекомендуемых к применению в небольших северных поселениях.

В качестве объекта исследования принята реальная сточная вода, отобранная в приемном резервуаре сливной станции, куда привозятся стоки не-

больших поселков. В числе контролируемых показателей качества очистки воды выбраны наиболее проблемные: pH; концентрация взвешенных веществ; химическое потребление кислорода; концентрация ионов аммония NH_4^+ ; концентрация нитрат-ионов NO_3^- .

Данные показатели качества стоков определялись в исходных пробах до обработки и в пробах после каждого этапа очистки по стандартным методикам.

Водородный показатель определялся потенциометрическим методом с помощью pH метра pH-150 МИ.

Концентрация взвешенных веществ определялась гравиметрическим методом путем измерения массы веществ, задержанных на бумажном фильтре.

Определение ХПК, концентрации ионов аммония и нитрат-ионов осуществлялось фотометрическим методом по методике. При определении ХПК в стеклянные вials помещали 3 см³ смеси бихромата калия и сернокислого серебра, растворенного в серной кислоте, 0,2 см³ катализатора сульфата ртути и 2 см³ исследуемой пробы. После чего содержимое вials выдерживали 2 ч при температуре 150 °С в термореакторе «Термион», а затем после охлаждения фотометрировали на анализаторе жидкости «Флюорат-0,2М».

Концентрации ионов аммония и нитрат-ионов определялись фотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ 5400ВИ. Для определения концентрации ионов аммония к 50 см³ пробы добавляли по 1 см³ калия-натрия виннокислого и реактива Несслера, затем перемешивали и через 10 мин измеряли концентрацию NH_4^+ . При определении концентрации нитратов 10 см³ исходной воды смешивали с 2 см³ салициловой кислоты и выпаривали в фарфоровой чашке на водяной бане. После охлаждения к сухому остатку добавляли 2 см³ раствора серной кислоты, 10 см³ дистиллированной воды и 15 см³ смеси сегнетовой соли и гидроксида натрия. Содержимое помещали в мерную колбу и доводили объем до 50 см³. Полученный раствор фотометрировали.

Проба исследуемой воды отбиралась в 5-литровые бутылки, затем в исходной воде определялись все требуемые показатели. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества исходной сточной воды

Показатель	Ед. изм.	Результат измерения
pH	ед. pH	7,34
Взвешенные вещества	мг/дм ³	977
ХПК	мгО/дм ³	1220
Ион аммония	мг/дм ³	151,0
Нитрат-ионы	мг/дм ³	5,10

Согласно данным таблицы, концентрация загрязнений по ряду показателей значительно превышает значения, характерные для хозяйственно-бытовых сточных вод больших населенных пунктов.

С целью исследования физико-химических методов была предложена технологическая схема очистки сточных вод, заключающаяся в первичной коагуляции стоков (для снятия взвешенных веществ и части органических

веществ) с последующим окислением реагентами (для удаления оставшейся органики и загрязнений азотной группы).

Для выбора оптимальной дозы коагулянта было рассмотрено пять типов коагулянтов: три алюмосодержащих и два железосодержащих:

- сернокислый алюминия, 3,64%-й раствор;
- оксихлорид алюминия, 3,53%-й раствор;
- полиоксихлорид алюминия «Аква-Аурат 30», 5%-й раствор;
- сернокислое железо, 5%-й раствор;
- хлорное железо, 5%-й раствор.

В качестве флокулянтов были выбраны:

- полиакриламид, 0,5%-й раствор;
- Praestol 650 TR, 1%-й раствор.

Исходная вода помещалась в цилиндр объемом 250 см³, затем добавлялся коагулянт, а через 2 мин – флокулянт. После интенсивного перемешивания в течение 2 мин вода оставлялась в покое на 20 минут для начала процесса хлопьеобразования и дальнейшего осаждения хлопьев. Для удаления взвешенных веществ пробы воды фильтровались через песчаную загрузку (диаметр фракций песка 0,8–2 мм). После фильтрования в воде определялись требуемые показатели качества. Результаты пробной коагуляции приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

**Показатели сточной воды после коагуляции с применением
в качестве коагулянта сернокислого алюминия (СА)**

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	30	50	90	200
ХПК, мгО/дм ³	1078	556	440	420
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	149,5	152	151	148
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	1,79	1,38	2,13	1,56

Таблица 3

**Показатели сточной воды после коагуляции с применением
в качестве коагулянта оксихлорида алюминия (ОХА)**

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	30	50	90	200
ХПК, мгО/дм ³	504	610	508	750
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	152,5	150,5	151	152,5
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	2,06	1,81	1,30	0,78

Таблица 4

**Показатели сточной воды после коагуляции с применением
в качестве коагулянта полиоксихлорида алюминия («Аква-Аурат 30»)**

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	30	50	90	200
ХПК, мгО/дм ³	714	436	480	706
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	148	150,5	150,5	148
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	1,21	1,62	1,89	1,19

На рис. 1 представлен график зависимости концентрации ХПК от дозы для алюмосодержащих коагулянтов.

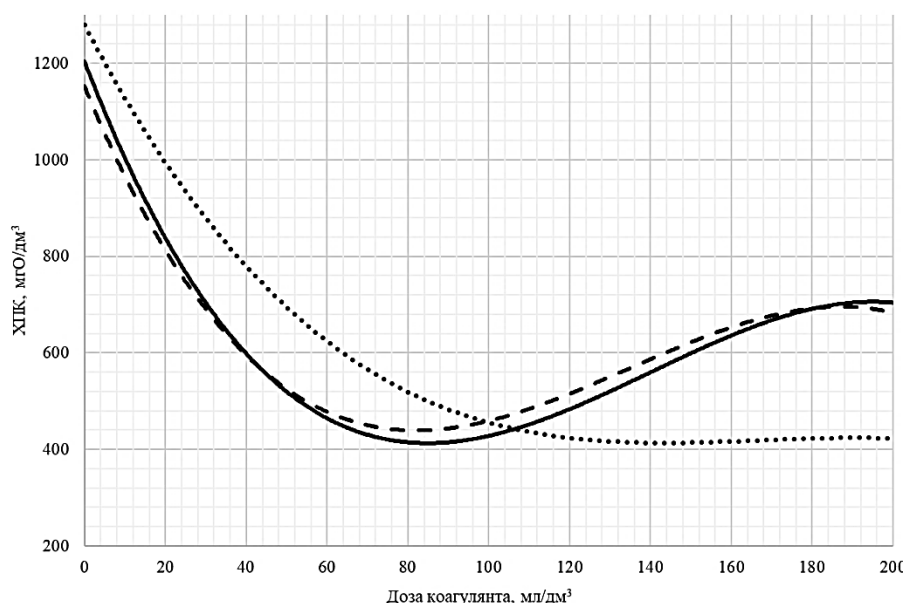


Рис. 1. График зависимости концентрации ХПК в сточной воде от дозы коагулянта для различных реагентов

Согласно полученным результатам, наибольший эффект снижения химического потребления кислорода (64,2 %) наблюдался при добавлении в сточную воду коагулянта «Аква-Аурат 30» дозой 50 мг/дм³. В этом случае наблюдалось и снижение концентрации нитратов: при оптимальной дозе коагулянта эффект удаления нитрат-ионов из воды составил 68,2 %. Концентрация ионов аммония оставалась неизменной.

При использовании железосодержащих коагулянтов (сернокислородное и хлорное железо) при дозе 50 и 90 мг/дм³ в течение 20 мин не наблюдалось образования видимых хлопьев. При добавлении хлорного железа дозой 120 мг/дм³ начинали образовываться устойчивые хлопья; для образования устойчивых хлопьев при использовании сернокислородного железа осуществлялось одновременное добавление коагулянта дозой 120 мг/дм³ и подкисление до pH = 4,74. Дальнейшее исследование процесса коагуляции с применением железосодержащих коагулянтов не производилось ввиду экономической нецелесообразности их применения для данных стоков.

С целью интенсификации процесса коагуляции в пробы воды добавлялись растворы флокулянтов. Выбор типа флокулянта и оптимальной его дозы осуществлялся на основе результатов эксперимента, представленных в табл. 5 и 6.

Согласно полученным данным, флокулянт способствует дополнительному снижению концентрации органических веществ в воде на 4–6 %. Наилучшее снижение ХПК наблюдалось при дозе полиакриламида 1 мг/дм³ – 70,1 %. Эффект очистки сточных вод от нитратов составил при этом 75,9 %.

Удаление взвешенных веществ произошло на 96 %. pH стоков после фильтрования равен 6,58.

Таблица 5

**Снижение ХПК в процентном соотношении
относительно исходной концентрации в сточной воде**

Флокулянт	Исходное значение ХПК, мгО/дм ³	Доза флокулянта			
		0,5 мг/дм ³		1 мг/дм ³	
		ХПК, мгО/дм ³	Эффект очистки	ХПК, мгО/дм ³	Эффект очистки
Полиакриламид	1220	429	64,8 %	365	70,1 %
Praestol 650TR	1220	392	67,9 %	403	67 %

Таблица 6

**Снижение нитратов в процентном соотношении
относительно исходной концентрации в сточной воде**

Флокулянт	Исходное значение NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	Доза флокулянта			
		0,5 мг/дм ³		1 мг/дм ³	
		NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	Эффект очистки	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	Эффект очистки
Полиакриламид	5,1	1,54	69,8 %	1,57	69,2 %
Praestol 650TR	5,1	1,25	75,5 %	1,23	75,9 %

Таким образом, на основании результатов пробной коагуляции можно сделать вывод о том, что оптимальная доза коагулянта «Аква-Аурат 30» составляет 50 мг/дм³, флокулянта полиакриламида – 1 мг/дм³.

Для удаления из сточной воды оставшейся части органических веществ, а также удаления загрязнений, обусловленных соединениями азотной группы, осуществлялось окисление профильтрованной воды. В качестве реагента-окислителя рассматривались три варианта: перманганат калия; гипохлорит натрия; пероксид водорода + озонирование (процесс «Пероксон»).

При проведении окисления в профильтрованную сточную воду объемом 0,5 дм³ добавлялась требуемая доза реагента и обеспечивался контакт воды и окислителя в течение 20 мин. По истечении данного времени сточная вода проходила двухступенчатое фильтрование на механических песчаных фильтрах (диаметр фракции загрузки 1 мм) и сорбционном угольном фильтре. Результаты окисления сточных вод перманганатом калия (концентрация вводимого реагента 0,02 моль/дм³) и последующего двухступенчатого фильтрования представлены в табл. 7.

Таблица 7

Окисление сточных вод перманганатом калия

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	5	10	20	50
pH	8,87	8,87	8,85	8,82
ХПК, мгО/дм ³	205	112	178	167
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	106,7	39,3	98,3	110,6
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	5,12	0,89	0,70	1,69

Согласно таблице, оптимальной дозой перманганата калия является доза 10 мг/дм³, при которой достигается эффект снижения ХПК 90,8 %, аммония 74 %, нитратов 82,5 %. рН стоков после двухступенчатого фильтрования составил 8,87, концентрация остаточного марганца в воде 0,36 мг/дм³.

Для гипохлорита натрия и пероксида водорода + озонирование было проведено пробное исследование со следующими дозами:

– доза гипохлорита натрия по активному хлору – 20 мг/дм³, время контакта – 20 мин;

– доза пероксида водорода – 100 мг/дм³, после 10 мин контакта – озонирование (производительность по озону 400 мг/ч), время озонирования – 20 мин.

Результаты пробных исследований приведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты пробного исследования гипохлорита натрия и пероксида водорода + озонирование

Окислитель	ХПК	
	Остаточная концентрация, мгО/дм ³	Эффект удаления, %
Гипохлорит натрия	208	82,9
Пероксид водорода + озонирование	258	78,8

По результатам пробного окисления эффект снижения ХПК меньше (80 %) по сравнению с окислением перманганатом калия. В дальнейшем предполагается более детальное исследование данных способов окисления.

На основании проведенного исследования предлагаются следующие технологические схемы очистки сточных вод малых населенных пунктов в арктических регионах (рис. 2 и 3).

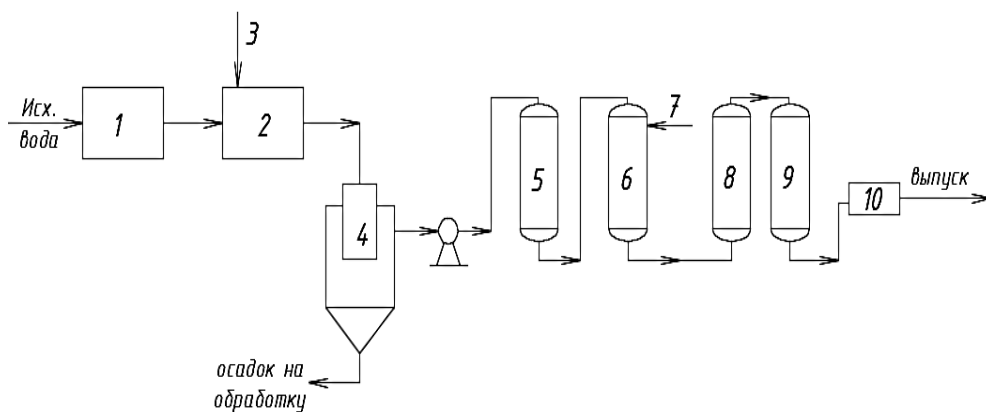


Рис. 2. Технологическая схема А (при добавлении перманганата калия/гипохлорита натрия):

1 – сливная станция; 2 – смеситель; 3 – ввод коагулянта и флокулянта; 4 – вертикальный отстойник со встроенной камерой хлопьеобразования; 5 – механический фильтр; 6 – контактная камера (для обеспечения времени контакта окислителя с водой); 7 – ввод окислителя (перманганат калия или гипохлорит натрия); 8 – механический фильтр; 9 – сорбционный угольный фильтр; 10 – обеззараживание

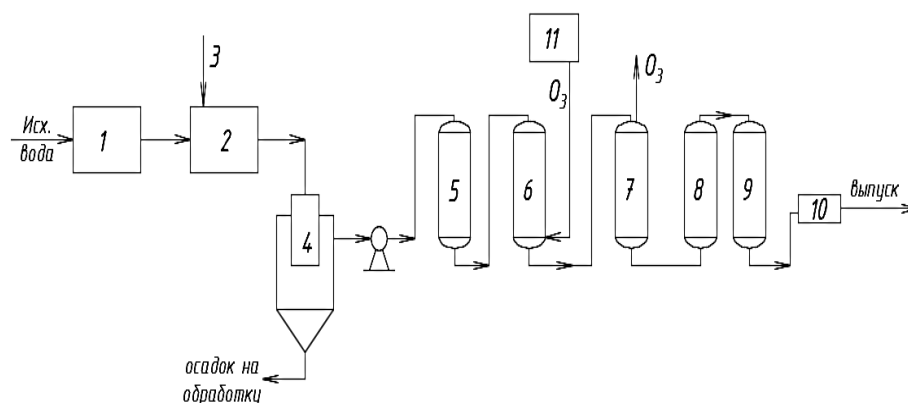


Рис. 3. Технологическая схема Б (при озонировании):

1 – сливная станция; 2 – смеситель; 3 – ввод коагулянта и флокулянта; 4 – вертикальный отстойник со встроенной камерой хлопьеобразования; 5 – механический фильтр; 6 – контактная камера (для обеспечения времени контакта озона с водой); 7 – дегазатор (для удаления избытка озона из воды); 8 – механический фильтр; 9 – сорбционный угольный фильтр; 10 – обеззараживание; 11 – блок подготовки озono-воздушной смеси

Приведенные схемы являются наиболее эффективными в отношении очистки бытовых сточных вод. Кроме этого, основываясь на результатах проведенной научно-исследовательской работы по изучению возможности замены биологического этапа очистки хозяйственно-бытовых сточных вод малых населенных пунктов физико-химическими методами, можно сделать следующие выводы:

В небольших населенных пунктах, расположенных в районах Крайнего Севера или приравненных к ним условиях, биологическая очистка сточных вод является сложно реализуемым процессом в связи с суровыми климатическими условиями, неравномерностью подачи стоков на очистку, сложностью эксплуатации, отсутствием квалифицированного персонала и другими причинами.

Опубликованные исследования отечественных и зарубежных ученых подтверждают возможность полной замены биологического этапа очистки стоков на физико-химические методы: коагуляцию, окисление и др. Это не противоречит действующим нормативам (СП 32.13330.2018).

По результатам лабораторного исследования, представленного в данной статье, предложены две возможные технологические схемы физико-химической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод:

I. Коагуляция – Осветление на механических фильтрах – Химическое окисление перманганатом калия или гипохлоритом натрия – Доочистка на механических и сорбционных фильтрах – Обеззараживание.

II. Коагуляция – Осветление на механических фильтрах – Окисление пероксидом водорода – Озонирование – Доочистка на механических и сорбционных фильтрах – Обеззараживание.

Как наиболее эффективные по результатам пробной коагуляции были приняты коагулянт полиоксихлорид алюминия «Аква-Аурат 30») (доза 50 мг/дм³) и флокулянт полиакриламид (доза 1 мг/дм³).

Снижение ХПК произошло на 90,8 % при окислении стоков перманганатом калия, на 78–83 % при окислении гипохлоритом натрия и совместном применении пероксида водорода и озона. Снижение концентрации взвешенных веществ во всех случаях достигается на 93–96 %.

Несмотря на значительное снижение содержания органических веществ в стоках, не удалось достичь концентраций, рекомендуемых для сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения.

На основании вышеизложенного предполагается дальнейшее более глубокое исследование динамики снижения загрязнений в сточных водах в процессе физико-химической очистки. Планируется экспериментальная проверка других способов обработки воды, а также изменение доз вводимых реагентов и очередности их введения. Необходимо отметить, что получаемый в процессе реагентной обработки осадок также подлежит исследованию на класс экологической опасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вялкова Е.И.* Моделирование процессов очистки сточных вод малых населенных пунктов // Проектирование, строительство топливно-энергетического комплекса (опыт и инновации) : материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 102–107.
2. *Кофман В.Я.* Водоснабжение и водоотведение в Арктическом регионе: Гренландия, Канада, США (обзор) // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 6. С. 56–64.
3. *Life in Greenland, and Its Supporting Infrastructure* // Journal of the Northern Territories Water and Waster Association. – URL: http://ntwwa.com/wp-content/uploads/2018/03/NTWWA_Journal_2017.pdf (дата обращения: 21.11.2019).
4. *Gunnarsdóttir R., Jenssen P.D., Jensen P.E., Villumsen A., Kallenborn R.* A review of wastewater handling in the Arctic with special reference to Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) and microbial pollution // Ecological Engineering. 2013. V. 50. P. 76–85.
5. *Heaven S., Lock A.C., Pak L.N., Rspaev M.K.* Waste stabilisation ponds in extreme continental climates: a comparison of design methods from the USA, Canada, northern Europe and the former Soviet Union // Water Science & Technology. 2003. V. 48. № 2. P. 25–33.
6. *Quiroga F.J.T.* Waste Stabilization Ponds for Waste Water Treatment, Anaerobic Pond. URL: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/Fernando%20J.%20Trevino%20Quiroga.pdf> (дата обращения: 25.11.2019).
7. *Paruch A.M., Mæhlum T., Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Ostojski A.* Rural domestic wastewater treatment in Norway and Poland: Experiences, cooperation and concepts on the improvement of constructed wetland technology // Water Science & Technology. 2011. V. 63. P. 776–781.
8. *Gao H., Scherson Y.D., Wells G.F.* Towards energy neutral wastewater treatment: Methodology and state of the art // Environmental Science: Processes & Impacts. 2014. V. 16. P. 1223–1246.
9. *Du Z., Li H., Gu T.* A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy // Biotechnology Advances. 2007. V. 25. P. 464–482.
10. *Liu H., Ramnarayanan R., Logan B.* Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell // Environ. Sci. Technol. 2004. V. 38. P. 2281–2285.
11. *Кофман В.Я.* Водоснабжение и водоотведение в Арктическом регионе: современные технические решения (обзор) // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 7. С. 56–64.
12. *LaBarge N., Yilmazel Y.D., Hong P., Logan B.* Effect of pre-acclimation of granular activated carbon on microbial electrolysis cell startup and performance // Bioelectrochemistry. 2007. V. 113. P. 20–25.
13. *Stasinakis A.S.* Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – a mini review // Global NEST Journal. 2008. V. 10. P. 376–385.

14. Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery // *Catalysis Today*. 1997. V. 53. P. 51–59.
15. Deng Y., Zhao R. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment // *Curr Pollution Rep.* 2015. V. 1. P. 167–176.
16. Oturan M.A., Aaron J. Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. V. 44. P. 2577–2641.
17. Brillas E., Casado J. Aniline degradation by Electro-Fenton and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater treatment // *Chemosphere*. 2002. V. 47. P. 241–248.
18. Chong M.N., Jin B., Chow C.W.K., Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review // *Water research*. 2010. V. 44. P. 2997–3027.
19. Желовицкая А.В., Ермолаева Е.А., Дресвянников А.Ф. Окисление органических соединений с помощью гидроксид-радикала, генерируемого в растворах химическим и электрохимическим методами // *Вестник Казанского университета*. 2008. С. 211–229.
20. Brillas E., Mur E., Sauleda R., SaÁnchez L., Peral J., DomeÁnech X., Casado J. Aniline mineralization by AOP's: anodic oxidation, photocatalysis, electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes // *Applied Catalysis B: Environmental*. 1998. V. 16. P. 31–42.
21. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment // *Separation and Purification Technology*. 2004. V. 38. P. 11–41.
22. Sarala C. Domestic Wastewater Treatment by Electrocoagulation with Fe-Fe Electrodes // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2012. V. 3. P. 530–533.

REFERENCES

1. Vialkova E.I. Modelirovanie processov ochistki stochnykh vod mal'nykh naselennykh punktov [Modeling of processes of wastewater treatment in small towns]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii "Proektirovanie, stroitel'stvo toplivno-energeticheskogo kompleksa (opyt i innovacii)" (Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Design and Construction of Energy Economy (Experience and Innovations))*. 2019. Pp. 102–107. (rus)
2. Kofman V.Ia. Vodosnabzhenie i vodootvedenie v Arkticheskom regione: Grenlandiya, Kanada, SSHA (obzor) [Water supply and wastewater disposal in the Arctic region: Greenland, Canada, USA (a review)]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2019. No. 6. Pp. 56–64. (rus)
3. Life in Greenland, and its supporting infrastructure. *Journal of the Northern Territories Water and Waster Association*. Available: http://ntwwa.com/wp-content/uploads/2018/03/NTWWA_Journal_2017.pdf (accessed October 21, 2019).
4. Gunnarsdóttir R., Jenssen P.D., Jensen P.E., Villumsen A., Kallenborn R. A review of wastewater handling in the Arctic with special reference to pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and microbial pollution. *Ecological Engineering*. 2013. V. 50. Pp. 76–85.
5. Heaven S., Lock A.C., Pak L.N., Rspaev M.K. Waste stabilisation ponds in extreme continental climates: a comparison of design methods from the USA, Canada, northern Europe and the former Soviet Union. *Water Science and Technology*. 2003. V. 48. No. 2. Pp. 25–33.
6. Quiroga F.J.T. Waste stabilization ponds for waste water treatment, anaerobic pond. Available: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/Fernando%20J.%20Trevino%20Quiroga.pdf> (accessed October 25, 2019).
7. Paruch A.M., Mæhlum T., Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Ostojski A. Rural domestic wastewater treatment in Norway and Poland: Experiences, cooperation and concepts on the improvement of constructed wetland technology. *Water Science and Technology*. 2011. V. 63. Pp. 776–781.
8. Gao H., Scherson Y.D., Wells G.F. Towards energy neutral wastewater treatment: Methodology and state of the art. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2014. V. 16. Pp. 1223–1246.
9. Du Z., Li H., Gu T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*. 2007. V. 25. Pp. 464–482.
10. Liu H., Ramnarayanan R., Logan B. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. 2004. V. 38. Pp. 2281–2285.

11. Kofman V.Ia. Vodosnabzhenie i vodootvedenie v Arkticheskom regione: sovremennye tekhnicheskie resheniya (obzor) [Water supply and wastewater disposal in the Arctic Region: advanced technical solution (a review)]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2019. No. 7. Pp. 56–64. (rus)
12. LaBarge N., Yilmazel Y.D., Hong P., Logan B. Effect of pre-acclimation of granular activated carbon on microbial electrolysis cell startup and performance. *Bioelectrochemistry*. 2007. V. 113. Pp. 20–25.
13. Stasinakis A.S. Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – a mini review. *Global NEST Journal*. 2008. V. 10. Pp. 376–385.
14. Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*. 1997. V. 53. Pp. 51–59.
15. Deng Y., Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports*. 2015. V. 1. Pp. 167–176.
16. Oturan M.A., Aaron J. Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. V. 44. Pp. 2577–2641.
17. Brillas E., Casado J. Aniline degradation by Electro-Fenton and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater treatment. *Chemosphere*. 2002. V. 47. Pp. 241–248.
18. Chong M.N., Jin B., Chow C.W.K., Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research*. 2010. V. 44. Pp. 2997–3027.
19. Zhelovickaya A.V., Ermolaeva E.A., Dresvyannikov A.F. Okislenie organicheskikh soedinenij s pomoshch'yu gidroksid-radikala, generiruemogo v rastvorah himicheskimi i elektrohimicheskimi metodami [Oxidation of organic compounds with hydroxide-radical chemically and electrochemically generated in solutions]. *Vestnik Kazanskogo universiteta*. 2008. Pp. 211–229. (rus)
20. Brillas E., Mur E., Sauleda R., SaÁnchez L., Peral J., DomeÁnech X., Casado J. Aniline mineralization by AOP's: anodic oxidation, photocatalysis, Electro-Fenton and Photoelectro-Fenton processes. *Applied Catalysis B: Environmental*. 1998. V. 16. Pp. 31–42.
21. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. 2004. V. 38. Pp. 11–41.
22. Sarala C. Domestic wastewater treatment by electrocoagulation with Fe-Fe electrodes. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2012. V. 3. Pp. 530–533.

Сведения об авторах

Вялкова Елена Игоревна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, vyalkova-e@yandex.ru

Глуценко Екатерина Сергеевна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ekaterina.gluschenko.1997@mail.ru

Велижанина Татьяна Сергеевна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ya.tshmidt@yandex.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. геол.-минерал. наук., доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kyky60@bk.ru

Authors Details

Elena I. Vialkova, PhD, A/Professor, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, vyalkova-e@yandex.ru

Ekaterina S. Glushchenko, MSc, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, ekaterina.gluschenko.1997@mail.ru

Tatjana S. Velizhanina, MSc, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, ya.tshmidt@yandex.ru

Elena Y. 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 624.151.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-164-170

*В.Е. КОЗЛОВСКИЙ, Е.В. ГОРОДНОВА, С.С. КОЛМОГОРОВА,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I*

ОБ ОСАДКАХ КОНСТРУКЦИЙ НА КОМБИНИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЯХ

В настоящей работе рассмотрено взаимодействие строительной конструкции с грунтом основания с целью выяснения влияния его упругих свойств на деформации конструкции и усилия в ней. Модель грунта принята упругой, по Э. Винклеру, с коэффициентом постели, вычисленным по функции угасания напряжений Г.В. Колосова. В расчетах применён численный метод Б.Г. Галёркина с использованием базисных функций, соответствующих характеру закрепления разрезной и неразрезной конструкции по краям. Неизвестные коэффициенты в линейных комбинациях базисных функций находились методами линейной алгебры путём решения системы уравнений. Функции усилий в конструкции найдены дифференцированием функции прогибов. Геологические параметры приняты реальными, соответствующими условиям строительства крупного производственно-складского комплекса сельскохозяйственного назначения в Псковской области РФ. Произведена оценка влияния грунта под разрезной и неразрезной конструкциями на изгибающие моменты, перерезывающие силы и опорные реакции при имеющихся геологических параметрах грунтов. Дан прогноз ожидаемых осадков от эксплуатационной нагрузки.

Ключевые слова: основание; фундамент; деформация.

Для цитирования: Козловский В.Е., Городнова Е.В., Колмогорова С.С. Об осадках конструкций на комбинированных основаниях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 164–170.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-164-170

*V.E. KOZLOVSKII, E.V. GORODNOVA, S.S. KOLMOGOROVA,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*

STRUCTURE SETTING ON COMPOSITE-BASED SOILS

The paper studies the interaction between the building construction and composite-based soil with a view to determine its elastic properties affecting the structure deformation and internal forces. The soil model is assumed to be elastic, according to the Winkler coefficient calculated from the Kolosov stress decay function. The Galerkin numerical method used in calcu-

lations utilizes basic functions corresponding to the type of fixing the discontinuous and continuous structures. Unknown coefficients in linear combinations of basic functions are obtained via linear algebra methods, solving the system of equations. The force functions of the structure are found by derivation of the deflection function. Geological parameters are accepted to be real and matching the construction conditions of a large industrial warehouse of agricultural designation in the Pskov region, Russia. The soil effect on the flexural strength, shearing forces, and bearing reaction is estimated under the discontinuous and continuous structures at the available geological soil parameters. The structure setting on composite-based soils under the operating load is predicted herein.

Keywords: basement; foundation; deformation.

For citation: Kozlovskii V.E., Gorodnova E.V., Kolmogorova S.S. Ob osadkakh konstrukttsii na kombinirovannykh osnovaniyakh [Structure setting on composite-based soils]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 164–170. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-164-170

В строительстве нередко случаи, когда конструкция (балка либо плита) имеет комбинированное основание. По краям она может иметь жесткие опоры, опираться на фундаменты, а в пролете лежать на грунте. Возникает вопрос о распределении нагрузки между подстилающим конструкцию грунтом и краевыми опорами. Очевидно, что в процессе деформирования всей системы «конструкция – фундамент – грунт» произойдет перераспределение усилий взаимодействия. Такая комплексная постановка задачи потребует усложнения расчетного аппарата. В настоящей работе рассматривается лишь этап начального нагружения, т. е. выяснение распределения усилий между грунтом под конструкцией и фундаментами при нулевых осадках последних.

Используем для решения поставленной задачи вариационный метод Б.Г. Галёркина [1]. Имеется уравнение

$$Au = f,$$

где A – оператор теории упругости; u, f – соответственно неизвестная и известная функции.

В качестве u подбирается u_0 , представляющая собой линейную комбинацию базисных функций φ_j , соответствующих граничным условиям решаемой задачи. При этом должно быть выполнено следующее условие для всех $j = 1, 2, \dots$:

$$(Au_0 - f, \varphi_j) = 0.$$

Данное выражение представляет собой систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов при базисных функциях в выражении для u_0 . Функции u и f имеют смысл соответственно прогибов исследуемой конструкции и внешней нагрузки на неё. Следует отметить, что получаемая система уравнений в данном случае совпадает с системой Ритца [2].

Для построения системы уравнений были использованы базисные функции, соответствующие граничным условиям на прогиб u и его первую и вторую производные:

– для разрезной конструкции:

$$\varphi_j(x) = \frac{\sin j\pi x}{j^2};$$

– для неразрезной конструкции:

$$\varphi_{2j-1}(x) = \frac{1}{j^2} \left(\sin \frac{\lambda_j x}{l} - \frac{x}{l} \sin \lambda_j \right),$$

$$\varphi_{2j}(x) = \frac{1}{j^2} \left(\cos \frac{j\pi x}{l} - (-1)^j \right),$$

где λ_j положительные корни уравнения $\operatorname{tg} \lambda = \lambda$, равные соответственно $\lambda_1 = 4,49$, $\lambda_2 = 7,72$, $\lambda_3 = 10,90$ и т. д.

Произведена разбивка плитной конструкции на линейные элементы в виде разрезных и неразрезных полос шириной 1 м, опирающиеся в пролете на грунт и на неподвижные фундаменты, расположенные по краям. Грунт рассматривался как упругая (по Э. Винклеру) среда, обладающая коэффициентом постели K . В качестве условного критерия взаимной жесткости грунта и опирающейся на него конструкции принят коэффициент деформации α_ϵ [3].

Согласно таблице, при определенном соотношении упругих свойств конструкции и грунта, выраженном, например, в коэффициенте α_ϵ , влияние грунта на усилия в конструкции могут быть значительны.

Такой подход к анализу работы изгибаемых конструкций, лежащих на грунте, был применён при строительстве крупного производственно-складского здания в Псковской области. В нем плиты первого этажа, помимо опоры на грунт, передают нагрузку на фундаментные балки, расположенные по периметру плит (рис. 1). Балки опираются на точечные двух- и четырёхсвайные фундаменты, расположенные по квадратной сетке 6×6 м. Собственный вес плит полностью воспринимается грунтом, поскольку они бетонируются на месте. Требовалось определить, какая часть нагрузки на плиты передаётся на балки и через них на фундаменты и какую часть воспринимает грунт.

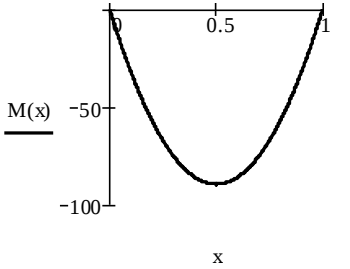
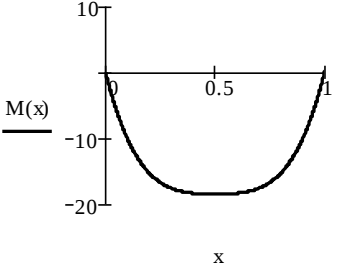
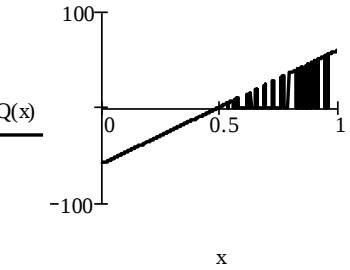
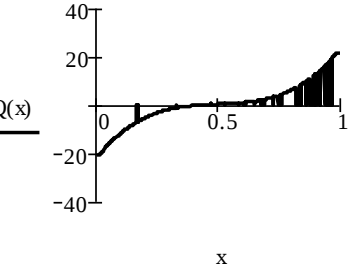
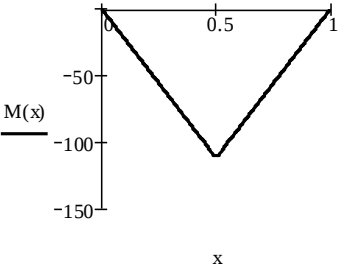
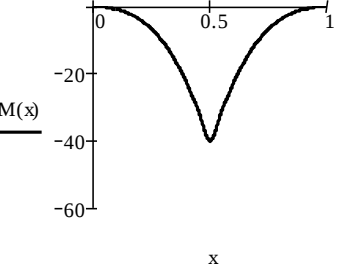
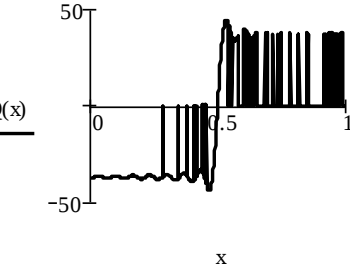
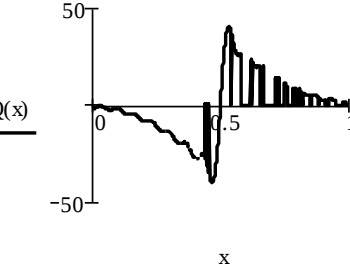
Были рассмотрены разрезные плиты, рассечённые над фундаментными балками, и неразрезные. В расчетные схемы плит, лежащих на грунте, введены некоторые упрощения. Плиты рассматривались как совокупность разрезных и неразрезных полос шириной 1 м. В этом случае ожидаемые осадки больше, чем для плит, опёртых по контуру, и влияние грунта также значительнее.

Грунты, подстилающие плиты, имеют модуль деформации E в пределах от 10 до 20 МПа. Коэффициент постели K грунта под полосой шириной 1 м определяется по формуле

$$K = \frac{\pi E}{2\beta} \left[\int_0^{H_c} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{z^3}{[\zeta^2 + z^2]^2} d\zeta dz \right]^{-1},$$

где H_c – глубина сжимаемой толщи, определяемая согласно п. 5.6.41 [4], коэффициент $\beta = 0,8$.

Влияние свойств грунтового основания на усилия в конструкции

Нагрузка		Без учета грунтового основания $\alpha_{\varepsilon} = 0$	С учетом грунтового основания $\alpha_{\varepsilon} = 3$
Равномерно распределенная	Изгибающие моменты		
	Перерезывающие силы		
Сосредоточенная в центре	Изгибающие моменты		
	Перерезывающие силы		

Для указанных границ диапазона значений E коэффициенты постели оказались равными соответственно 4400 и 8200 кПа/м.

В ходе расчетов было установлено, что влияние грунта под конструкцией на изгибающие моменты, перерезывающие силы и опорные реакции при имеющихся коэффициентах постели грунтов отсутствует. Имеющийся диапазон значений K соответствует интервалу коэффициентов $\alpha_{\varepsilon} = 0,6-0,9$, что, согласно графикам на рис. 2 и 3, не дает существенного вклада в работу конструкции, лежащей на грунте.



Рис. 1. Конструкция опирания плиты первого этажа

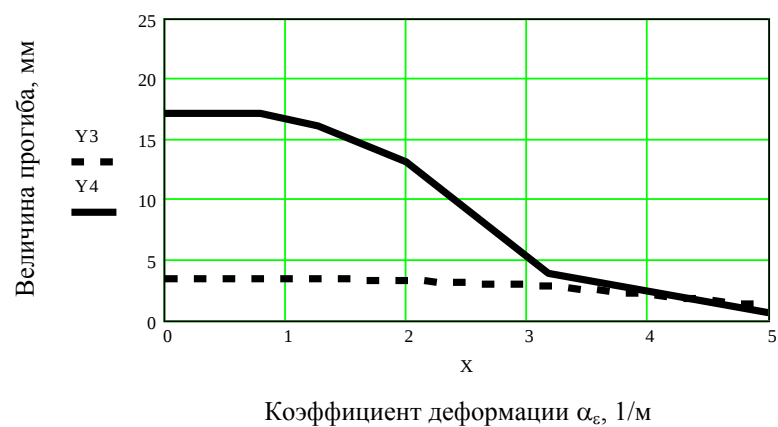


Рис. 2. Зависимость прогиба конструкции от коэффициента деформации для разрезного (сплошная линия) и неразрезного (пунктир) случаев

Таким образом, на начальном этапе нагрузка полностью передается на опоры (фундаментные балки), а через них на фундаменты. Подстилающий грунт конструкцию не разгружает. При коэффициенте деформации α_ϵ более 1,0 влияние грунта в работе конструкции становится более ощутимым, причем это верно для разрезных конструкций. Неразрезные конструкции, согласно рис. 2, менее чувствительны к работе грунта под их подошвой на всем интервале изменения α_ϵ . При увеличении коэффициента деформации более 3,0 различия в прогибе разрезных и неразрезных конструкций пропадают.

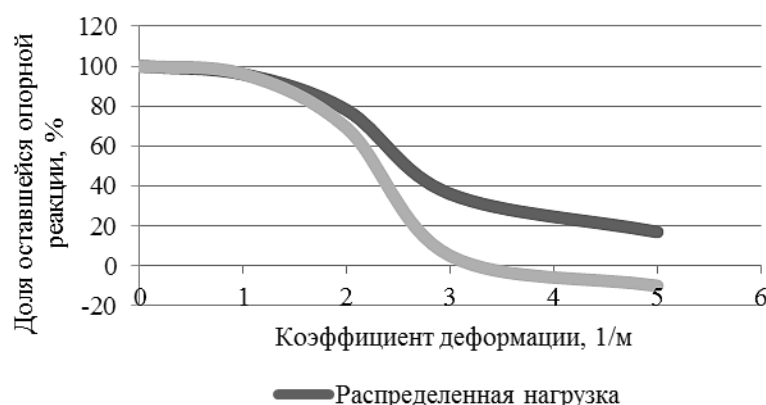


Рис. 3. Зависимость доли (%) оставшейся опорной реакции в подкрепленной грунтом конструкции от коэффициента деформации α_e , 1/м

Следует отметить, что полученные результаты расчетов верны лишь для конструкций, фундаменты которых статичны, неподвижны. В процессе оседания фундаментов расположенные выше балки и плиты также получают вертикальные смещения, и грунт под ними будет включен в работу.

Свайные фундаменты под эксплуатационной нагрузкой, как показали расчеты, получают полные осадки в интервале 5,4–7,5 см, при этом плиты первого этажа «опустятся» на грунт. Их собственные осадки на грунтах с модулями общей деформации 10, 15 и 20 МПа соответственно будут равны 4,8, 3,2 и 2,5 мм.

Вследствие разности вычисленных осадок фундаментов и плит можно полагать, что произойдет разгрузка свайных фундаментов на величину, равную временной нагрузке на уровне первого этажа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике. Москва : Мир, 1985. 590 с.
2. Байкова А.И., Махонько А.А., Козловский В.Е. Расчет гибкого свайного ростверка с геосеткой при усилении железнодорожного пути // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : материалы Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2016. С. 31–35.
3. СП 24.13330.2011 (03.12.2016). Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85. Москва : ФГУП ЦПП, 2010.
4. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*.

REFERENCES

1. Rektorys K. Variatsionnye metody v matematicheskoi fizike i tekhnike [Variational methods in mathematics, science and engineering]. Moscow: Mir, 1985. 590 p. (rus)
2. Baykova A.I., Mahonko A.A., Kozlovsky V.E. Raschet gibkogo svainogo rostverka s geosetkoi pri usilenii zheleznodorozhnogo puti [Calculation of a flexible pile grillage with a geoset when strengthening a railway track]. In: Transport: problemy, idei, perspektivy : materialy Vserossi-

iskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (*Proc. All-Russ. Conf. 'Transport: Problems, Ideas, Prospects'*). St.- Petersburg, 2016. Pp. 31–35. (rus)

3. SNiP 24.13330.2011 (03.12.2016) Svainye fundamenty [Pile foundations]. (rus)
4. SNiP 22.13330.2016 Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Building footings]. (rus)

Сведения об авторах

Козловский Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Koslovskii@mail.ru

Городнова Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Elena.gorodnova@mail.ru

Колмогорова Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovsg@list.ru

Authors Details

Vladimir E. Kozlovskii, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Koslovskii@mail.ru

Elena V. Gorodnova, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Elena.gorodnova@mail.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: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-171-192

*О.В. МАТВИЕНКО^{1,2}, В.П. БАЗУЕВ¹,
И.С. ЧЕРКАСОВ², А.Е. ЛИТВИНОВА²,*

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО, ОПИСЫВАЕМОГО МОДЕЛЬЮ ОСТВАЛЬДА – ДЕ ВЕЙЛЯ, В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

В работе проведено исследование течения битумного вяжущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе, определена зависимость расхода жидкости от перепада давления, получены зависимости для радиального распределения скорости и эффективной вязкости течения. Структурирование среды, наиболее заметно проявляющееся при малых значениях показателя нелинейности, приводит к тому, что скорость течения в ядре потока характеризуется практически однородным профилем, что характерно для пластического течения. Течение псевдопластических сред с малым значением показателя нелинейности характеризуется наличием высоковязкого ядра и узкой области пристеночного течения с невысокими значениями эффективной вязкости. С увеличением консистенции среды величина среднерасходной вязкости увеличивается. Этот эффект наиболее выражен для низкоскоростных потоков, движущихся при малом перепаде давления. При низких значениях перепада давления неньютоновские свойства среды, обусловленные наличием внутренней структуры, приводят к значительному гидравлическому сопротивлению. С увеличением перепада давления гидравлическое сопротивление потока уменьшается, что связано с разрушением структуры среды.

Ключевые слова: реология; вязкопластические среды; вязкость; неньютоновские жидкости; модель Оствальда – де Вейля; битумные вяжущие.

Для цитирования: Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Литвинова А.Е. Исследование течения битумного вяжущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 171–192.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-171-192

O.V. MATVIENKO^{1,2}, V.P. BAZUEV¹, I.S. CHERKASOV², A.E. LITVINOVA²,
¹*Tomsk State University of Architecture and Building,*
²*National Research Tomsk State University*

LIQUID ASPHALT BINDERS IN CYLINDRICAL TUBE IN TERMS OF THE OSTWALD-DE WAELE MODEL

The liquid asphalt binder in a cylindrical tube is described in terms of the Ostwald-de Waele model. The dependence of the liquid flow rate on the pressure drop; dependencies are obtained for radial distribution of the flow rate and viscosity. The medium structuring, which is most noticeable at low values of nonlinearity leads to the almost uniform profile of the core flow rate, which is typical to the plastic flow. The liquid pseudoplastic media with a low nonlinearity is characterized by the presence of a highly viscous core and a narrow region of the near-wall flow with low values of effective viscosity. With increasing in medium consistency, the average viscosity increases. This effect is most pronounced for flow motions at a small pressure drop. For low values of the pressure drop, the non-Newtonian properties of the medium lead to a significant hydraulic resistance due to the presence of the inner structure. With increasing pressure drop, hydraulic resistance decreases due to the medium destruction.

Keywords: rheology; viscoplastic media; viscosity; non-Newtonian fluids; Ostwald-de Waele model.

For citation: Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Litvinova A.E. *Tekhnienie bitumnogo vyazhushchego, opisyyvaemogo 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. 171–192.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-171-192

Введение

Дорожное строительство является одним из важнейших факторов развития экономики. Автомобильные дороги составляют важнейшую часть транспортной инфраструктуры и оказывают существенное влияние на темпы социально-экономического развития.

Эффективность развития дорожного хозяйства в значительной степени определяется научно-техническим прогрессом. Основой его является деятельность, направленная на получение, распространение и использование новых знаний и технологий для решения экономических, технологических, социальных и иных проблем в дорожном хозяйстве.

Наиболее распространенным материалом для устройства слоев дорожного покрытия и верхних слоев оснований являются материалы на основе термопластичных органических вяжущих [1, 2]. К ним относятся различные виды асфальтобетонов, изготовленных с использованием битумных вяжущих (собственно битумы и многие его разновидности: битумы, модифицированные полимерами, битумы с различными добавками, эмульсии) [3, 4].

Повышенная транспортная нагрузка, а также увеличение объемов перевозок большегрузным транспортом приводит к преждевременному разрушению дорожных покрытий, срок службы которых составляет в среднем по России около 6 лет [5–7].

Одним из важнейших условий повышения долговечности асфальтобетонных покрытий является улучшение свойств битумов и правильный выбор их с учетом условий эксплуатации [8–10].

Основными направлениями исследований в этой области, кроме совершенствования технологии производства битумов, является регулирование их свойств путем применения различных модифицирующих добавок (полимеров, резиновой крошки, серы, адгезионных добавок и др.). Применение полимеров для модификации битумов относится к одной из наиболее активно внедряющихся технологий строительства и ремонта покрытий автомобильных дорог [11, 12].

Исследованию процессов модифицирования битумных вяжущих в различных технологических устройствах посвящен цикл работ [13–21]. Численное исследование структуры течения, перехода к турбулентности и теплообмена при закрученном течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах выполнено в работах [13, 14]. Результаты исследований смешения закрученных потоков битумного вяжущего и модификатора в смесительных устройствах приведены в работах [15–19]. В работах [20–22] представлены результаты исследования процессов модифицирования битумов в кавитационно-смесительном диспергаторе.

Битумы относятся к наиболее распространенным органическим вяжущим веществам и представляют собой сложную смесь из многочисленных и разнообразных по химическому строению жидких и твердых углеродов [23].

Поскольку элементный состав битумов дает приближенное представление о возможных химических соединениях, входящих в их состав, принято определять групповой химический состав. Разделение различных соединений на группы основано на их избирательном отношении к растворителям и адсорбентам. Из битумов обычно выделяют следующие группы углеводородов: масла, смолы (бензолные и спиртобензолные), асфальтены, реже асфальтогеновые кислоты и их ангидриды, карбены и карбоиды. Каждая из групп углеводородов представляет собой сложную смесь многих углеводородов различной молекулярной массы [24].

По своему физико-химическому строению битумы представляют коллоидную систему, в которой диспергированы асфальтены, а дисперсионной средой являются смолы и масла [25]. Асфальтены битума, диспергированные в виде частиц размером 18–20 мкм, являются ядрами, каждое из которых окружено оболочкой из масел и смол. Карбены и карбоиды – это практически нерастворимые твердые углероды, содержание которых в дорожных битумах настолько мало, что не влияет ощутимо на их свойства.

Свойства битума как дисперсной системы определяются соотношением входящих в него составных частей: масел, смол и асфальтенов. Повышение содержания асфальтенов и смол влечёт за собой возрастание твердости, температуры размягчения и хрупкости битума. Наоборот, масла, частично растворяющие смолы, делают битум мягким и легкоплавким. Снижение молекулярной массы масел и смол также повышает пластичность битума.

Главными показателями материала являются вязкость, пластичность и теплостойкость. Эти показатели взаимосвязаны. С увеличением содержания масел, повышением температуры и длительности воздействия нагрузок пони-

жается вязкость и возрастает пластичность. Смолы обуславливают вяжущие свойства битумов и дегтей, придают им пластичность, увеличивают клеящую способность. Асфальтены в битумах и свободный углерод в дегтях повышают температуру размягчения и твердость.

Вязкость битумных дисперсных систем

Среди механических свойств битума особое значение имеет вязкость. Чтобы гарантировать высокие вяжущие свойства, вязкость не должна быть слишком низкой. В то же время высокие значения вязкости способствуют хрупкости дорожного покрытия [26], которое облегчает развитие трещин и в конечном итоге приводит к разрушению дорожного покрытия. Вязкость битума также оказывает большое влияние на эксплуатацию битумных резервуаров и транспортировку битума.

Известно, что битумы обладают сильным неньютоновским поведением, особенно при низких температурах [27]. Неньютоновское поведение характеризуется зависящей от скорости деформации сдвиговой вязкостью и происходит вследствие специфической молекулярной структуры битума [23, 24], содержащего, в частности, асфальтеновые наноагрегаты.

Вязкость битумных дисперсных систем зависит от температуры, соотношения фаз, степени дисперсности и скорости течения и может сильно изменяться в технологическом процессе [23]. Подробный обзор исследований, посвященных течениям реологически сложных сред, приведен в монографиях [28–32].

Деформационное течение определяется тензором скоростей деформаций, компоненты которого в декартовой системе координат имеют вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (1)$$

Напряженное состояние среды описывается тензором напряжений σ_{ij} , который можно разложить на девиатор τ_{ij} и шаровую часть p , называемую давлением [28]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}. \quad (2)$$

Для построения моделей жидких сред нужно установить связь между девиаторами тензора скоростей деформации и тензора напряжений [29, 30]. В тензорно линейных моделях такая связь задаётся соотношением

$$\tau_{ij} = 2\mu_{\text{eff}} \dot{\varepsilon}_{ij}. \quad (3)$$

В классических моделях предполагается зависимость μ_{eff} только от второго инварианта девиатора тензора скоростей деформации [31]. В качестве вторых инвариантов тензоров $\dot{\varepsilon}$ и σ удобно ввести

$$U = \sqrt{2\dot{\varepsilon}_{ij}^D \dot{\varepsilon}_{ji}^D}, \quad T = \sqrt{\tau_{ij} \tau_{ij} / 2}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^D = \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij}$ – компоненты девиатора тензора скоростей деформации.

Из соотношения (3) вытекает следующее соотношение между инвариантами:

$$T = \mu_{\text{eff}} U, \quad (5)$$

где μ_{eff} – коэффициент эффективной динамической вязкости.

Если связь (5) установлена, то, подставляя её в уравнения движения и присоединяя уравнение неразрывности, а также формулируя необходимые начальные и граничные условия, получим замкнутую систему для определения поля течения.

В настоящее время известно несколько десятков, в основном эмпирических, реологических моделей нелинейно-вязких жидкостей. Такое положение обусловлено различной физической природой существующих текущих систем и отсутствием на сегодня теории, которая позволяла бы достаточно строго, как это делается в молекулярно-кинетической теории газов, вычислять характеристики молекулярного переноса и механического поведения среды, исходя из ее внутренней, микроскопической структуры [32].

В интервале температур от 30 до 70 °C битумные вязжущие проявляют вязкопластические свойства [23, 33]. При низких значениях сдвиговых напряжений вязкость битумных вязжущих принимает настолько высокие значения (порядка 10^9 Па·с), что течение среды становится невозможным. Однако при высоких значениях сдвиговых напряжений битумные вязжущие становятся текучими средами. Переход от твердого к жидкому состоянию происходит после того, как напряжение сдвига достигнет некоторого предела, получившего название предельного напряжения сдвига σ_Y . Предельное напряжение сдвига σ_Y характеризует прочность дисперсной структуры битумных вязжущих. Выше предельного напряжения сдвига происходит разрушение твердофазной структуры, что делает возможным вязкое течение материала. Таким образом, вязкое течение среды начинается после превышения предела текучести σ_Y [34].

Вязкопластичные среды с линейной кривой течения называют линейно-вязкопластичными (жидкостями Шведова – Бингама) [23, 35]. В случае нелинейной кривой течения говорят о нелинейно-вязкопластичных (так называемых небингамовских) средах. Реологическое поведение таких сред можно описать моделью Балкли – Гершеля, объединяющей в себе свойства модели псевдопластической жидкости Оствальда – де Вейля и вязкопластической среды Шведова – Бингама [36, 37].

При температурах выше 70 °C битумы становятся псевдопластическими, а при температуре более 100 °C – ньютоновскими жидкостями.

При аппроксимации результатов в интервале температур от 70 до 100 °C экспериментальных исследований течения битумных дисперсных систем в качестве одной из наиболее универсальных моделей можно использовать реологическую модель Кросса [27]:

$$\frac{\mu_1 - \mu_{\text{eff}}}{\mu_{\text{eff}} - \mu_2} = \left(\frac{U}{U_*} \right)^{1-n}, \quad (6)$$

где μ_1 , μ_2 – «первая» и «вторая» вязкость среды; n – показатель нелинейности; U_* – скорость сдвига, при которой происходит резкое изменение вязкости. При $1 < n$ среда проявляет дилатантные свойства, характерные для грубодисперсных суспензий [32, 38]. В этих средах эффективная вязкость возрастает при увеличении скорости сдвига. При этом μ_1 характеризует вязкость при бесконечной скорости сдвига ($\mu_1 = \mu_\infty$), а μ_2 – при нулевой ($\mu_2 = \mu_0$). Значениям $0 < n < 1$ отвечают псевдопластичные жидкости, эффективная вязкость которых убывает с ростом скоростей сдвига [31, 39]. С ростом скоростей сдвиговых деформаций среда «разжижается» и становится более подвижной. Простейший анализ показывает, что для псевдопластических сред ($0 < n < 1$) при малых скоростях сдвиговых деформаций ($U \rightarrow 0$) эффективная вязкость стремится к $\mu_{\text{eff}} \rightarrow \mu_1$, а при больших значениях скорости сдвига ($U \rightarrow \infty$) величина эффективной вязкости $\mu_{\text{eff}} \rightarrow \mu_2$. Таким образом, в псевдопластических средах μ_1 характеризует вязкость при нулевой скорости сдвига ($\mu_1 = \mu_0$), а μ_2 – при бесконечной ($\mu_2 = \mu_\infty$). Частными случаями модели Кросса являются модель ньютоновской жидкости ($n = 1$) [40] и модель Уильямсона ($n = 0$) [41].

Модель Кросса является обобщенной реологической моделью для не-ньютоновских жидкостей и применяется для описания сложных нелинейных моделей. Эта модель нашла применение для описания течения полимерных жидкостей, нефтяных смесей, эмульсий и т. п. [23, 24]. Однако применение этой модели в инженерных расчетах ограничивается невозможностью получения аналитического решения в широком диапазоне изменения параметров даже для простейших течений. Поэтому в инженерной практике получили распространение более простые модели, область применения которых ограничена определенным диапазоном изменения скоростей сдвига.

Известно, что реологические свойства битумных дисперсных систем характеризуются псевдопластичностью ($n < 1$) и значительным различием значений вязкости при нулевой и бесконечной скорости сдвига ($\mu_0/\mu_\infty \ll 1$). Рассмотрим течение псевдопластической жидкости в диапазоне скоростей сдвиговых деформаций $U_* \ll U$. В этом случае реологическая модель (6) преобразуется в реологическую модель Сиско [42]:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_\infty + \mu_0 \left(\frac{U}{U_*} \right)^{n-1}. \quad (7)$$

Введя обозначение $k = \mu_0 U_*^{1-n}$, уравнение (7) можно представить в традиционном виде:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_\infty + k U^{n-1}. \quad (8)$$

Постоянная k называется показателем (индексом) консистенции жидкости; чем меньше ее текучесть, тем больше k .

В диапазоне изменения скоростей сдвига, ограниченном значениями

$$U_* \ll U \ll U_* \left(\frac{\mu_0}{\mu_\infty} \right)^{1/(1-n)}, \quad (9)$$

вместо реологической модели Кросса становится возможным применить реологическую модель Оствальда – де Вейля [28, 43, 44]:

$$\mu_{\text{eff}} = kU^{n-1}. \quad (10)$$

Следует отметить, что для достаточно большого диапазона напряжений (скоростей) сдвига реальных жидкостей величины k и n будут непостоянны. Это не препятствует широкому использованию степенного реологического уравнения, т. к. на практике обычно приходится иметь дело с довольно ограниченным диапазоном скоростей сдвига.

Математическая модель

Целью настоящей работы является исследование установившегося течения битумного вязущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрическом канале.

Рассмотрим установившееся осесимметричное течение битумной эмульсии, описываемой реологическим соотношением Оствальда – де Вейля, в прямой горизонтальной трубе круглого сечения радиусом R , которое происходит под действием заданного постоянного градиента давления:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{L} = \text{const} < 0, \quad (11)$$

где Δp – перепад давления на длине трубы L ; x – осевая координата, направленная вдоль оси трубы.

В случае стабилизированного осесимметричного течения уравнение динамики вязкой жидкости приобретает вид

$$\frac{1}{r} \frac{d\tau_{rx} r}{dr} = -\left| \frac{dp}{dx} \right|. \quad (12)$$

Реологический закон Оствальда – де Вейля для установившегося течения в канале можно записать в виде

$$\tau_{rx} = k \left| \frac{du}{dr} \right|^{n-1} \frac{du}{dr}. \quad (13)$$

Рассмотрим течение степенной жидкости Оствальда – де Вейля. Подставляя реологическую зависимость (6), описывающую рассматриваемый класс сред, получим

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[kr \left| \frac{du}{dr} \right|^{n-1} \frac{du}{dr} \right] = -\left| \frac{dp}{dx} \right|. \quad (14)$$

Поскольку величина скорости убывает от оси к стенке, радиальная составляющая градиента скорости имеет отрицательные значения:

$$\frac{du}{dr} < 0. \quad (15)$$

С учетом соотношения (15) уравнение движения (14) может быть записано в виде

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[kr \left| \frac{du}{dr} \right|^n \right] = \left| \frac{dp}{dx} \right|. \quad (16)$$

Выпишем необходимые граничные условия. На оси течения должны выполняться условия симметрии, а на стенке трубы – условия прилипания. В результате граничные условия имеют вид

$$r=0: \frac{du}{dr} = 0; \quad r=R: u=0. \quad (17)$$

Однократное интегрирование уравнения (16) с учетом граничных условий приводит к следующему результату:

$$\frac{du}{dr} = - \frac{1}{(2k)^{1/n}} \left| \frac{dp}{dx} \right|^{1/n} r^{1/n}. \quad (18)$$

Рассмотрим распределение сдвиговых напряжений по сечению трубы. Из уравнения (18) следует, что

$$\tau_{rx} = -k \left| \frac{du}{dr} \right|^n = - \frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| r, \quad (19)$$

абсолютная величина сдвигового напряжения линейно возрастает от нуля на оси трубы до своего максимального значения на стенке трубы:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \left| \frac{dp}{dx} \right| R = \frac{\Delta p}{L} \frac{R}{2}.$$

Интегрирование уравнения (18) позволяет определить радиальное распределение осевой скорости в канале:

$$u = \frac{n}{n+1} \frac{R^{(n+1)/n}}{(2k)^{1/n}} \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{1/n} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right). \quad (20)$$

Максимальная скорость жидкости достигается на оси потока

$$u_{\max} = \frac{n}{n+1} \frac{R^{(n+1)/n}}{(2k)^{1/n}} \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|^{1/n}. \quad (21)$$

Расход жидкости через поперечное сечение трубы вычисляется по формуле

$$Q = 2\pi \int_0^R u r dr = \frac{\pi n R^3}{3n+1} \left(\frac{R}{2k} \left| \frac{dp}{dx} \right| \right)^{1/n}, \quad (22)$$

а среднерасходная скорость определяется как

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{n}{3n+1} R \left(\frac{R}{2k} \left| \frac{dp}{dx} \right| \right)^{1/n}. \quad (23)$$

Вязкие свойства потока можно характеризовать двумя величинами: эффективной вязкостью μ_{eff} , определяющей локальные свойства течения, и среднерасходной вязкостью $\bar{\mu}$, определяющей интегральные свойства потока.

Эффективная вязкость жидкости Оствальда – де Вейля μ_{eff} для гидродинамически стабилизированного течения в цилиндрической трубе может быть рассчитана с помощью реологического соотношения

$$\mu_{\text{eff}} = k \left| \frac{du}{dr} \right|^{n-1}. \quad (24)$$

Для определения эффективной вязкости воспользуемся реологическим соотношением (24) с учетом радиального распределения скорости (20). В результате получим

$$\mu_{\text{eff}} = k^{1/n} \left(\left| \frac{dp}{dx} \right| \frac{r}{2} \right)^{1-1/n}. \quad (25)$$

Определим среднерасходную вязкость неньютоновской жидкости $\bar{\mu}$ как вязкость ньютоновской жидкости, движущейся со среднерасходной скоростью $\bar{u}$ в трубе радиусом R под действием перепада давления $\left| \frac{dp}{dx} \right|$. Введение среднерасходной вязкости позволяет при проведении гидравлических расчетов вместо неньютоновской среды рассматривать ньютоновскую жидкость с вязкостью $\bar{\mu}$.

Для ньютоновской жидкости связь между перепадом давления и массовым расходом определяется выражением [40]

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\bar{\mu}} \left| \frac{dp}{dx} \right|. \quad (26)$$

Таким образом, среднерасходная вязкость потока $\bar{\mu}$ будет равна

$$\bar{\mu} = \frac{3n+1}{8n} (2k)^{1/n} R^{1-1/n} \left| \frac{dp}{dx} \right|^{1-1/n}. \quad (27)$$

В технических расчетах принято связывать перепад давления со среднерасходной скоростью течения с использованием коэффициента гидравлического сопротивления ζ , который характеризует безразмерное падение давления на единицу длины канала. Таким образом, перепад давления пропорционален динамическому напору и определяется зависимостью Дарси – Вейсбаха:

$$\left| \frac{dp}{dx} \right| = \zeta \frac{\rho \bar{u}^2}{4R}. \quad (28)$$

Подставляя в равенство (28) значения $\left| \frac{dp}{dx} \right|$ из формулы (17), получим выражения для коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\zeta = \left(\frac{6n+2}{n} \right)^2 \frac{(2k)^{2/n}}{\rho R^{1+2/n}} \left| \frac{dp}{dx} \right|^{1-2/n}. \quad (29)$$

Для характеристики потока жидкости Оствальда – де Вейля введем в рассмотрение число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости $\bar{u}$, среднерасходной вязкости $\bar{\mu}$ и диаметру трубы $d = 2R$, которое с учетом зависимостей (23), (27) определится как

$$\text{Re} = \rho \bar{u} d / \bar{\mu} = 16\rho \left(\frac{n}{3n+1} \right)^2 \frac{R^{1+2/n}}{(2k)^{2/n} \left| \frac{dp}{dx} \right|^{1-2/n}}. \quad (30)$$

Сравнение выражений (20) и (21) позволяет установить зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса:

$$\zeta = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (31)$$

Равенство (31) выражает закон сопротивления для течения степенной жидкости Оствальда – де Вейля.

Известно, что в полное гидравлическое сопротивление при течении вязкого газа в пористой среде вносят вклад потери, обусловленные трением на стенке, изменением скорости газа и действием массовых сил. В случае стабилизированного стационарного течения в отсутствии массовых сил последние две составляющие отсутствуют, и остаются только составляющие, связанные с трением на стенке. Для нахождения составляющей, связанной с трением, удобно использовать коэффициент трения

$$\psi = \frac{8\tau_w}{\rho \bar{u}^2} = \frac{4}{\rho} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^2 \frac{(2k)^{2/n} \left| \frac{dp}{dx} \right|^{1-2/n}}{R^{1+2/n}} = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (32)$$

Таким образом, для стабилизированного течения в трубе жидкости Оствальда – де Вейля коэффициент гидравлического сопротивления равен коэффициенту трения, т. к. гидравлическое сопротивление обусловлено только потерями на трение.

Результаты математического моделирования

Перейдем к анализу полученных результатов. При математическом моделировании диапазон изменения параметров был выбран соответствующим свойствам дорожных битумных вяжущих, модифицированных на основе полимеров стирол-бутадиен-стирол [26, 27], для различных температур. Радиус канала составлял $R = 0,1$ м.

На рис. 1 представлены радиальные распределения скорости, рассчитанные для одних и тех же значений реологических параметров, но различных перепадов давления. С ростом перепада давления увеличивается энергия, сообщаемая потоку, что приводит к возрастанию скорости потока.

Увеличение значений параметра консистенции приводит к росту гидравлического сопротивления и уменьшению расхода жидкости в трубе. При этом значения скорости уменьшаются по всему сечению трубы (рис. 2). Структурирование среды, наиболее заметно проявляющееся при малых зна-

чениях показателя нелинейности, приводит к тому, что скорость течения в ядре потока характеризуется практически однородным профилем, что характерно для пластического течения.

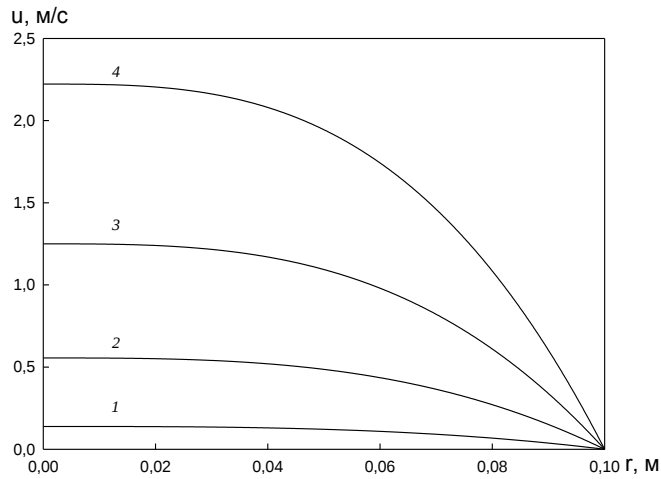


Рис. 1. Радиальное распределение скорости: $n = 0,5$; $k = 12,65 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$:
 1 – $|dp/dx| = 500 \text{ Па/м}$; 2 – $|dp/dx| = 1000 \text{ Па/м}$; 3 – $|dp/dx| = 1500 \text{ Па/м}$; 4 –
 $|dp/dx| = 2000 \text{ Па/м}$

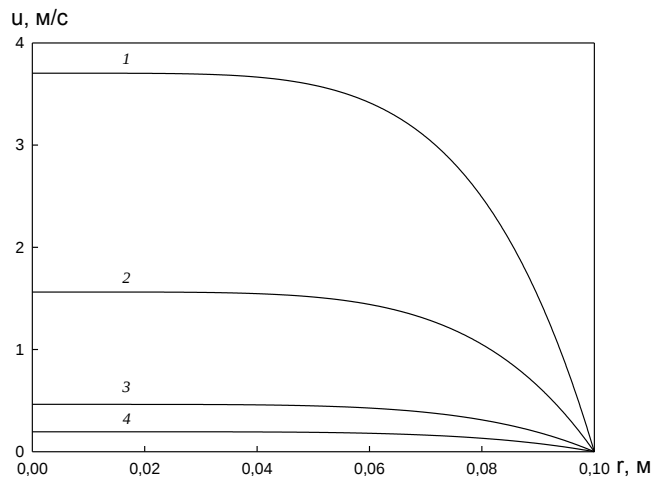


Рис. 2. Радиальное распределение скорости: $n = 0,25$, $|dp/dx| = 2000 \text{ Па/м}$:
 1 – $k = 27,1 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$; 2 – $k = 33,64 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$; 3 – $k = 45,6 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$; 4 – $k = 56,57 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$

На рис. 3 представлено распределение скорости по радиусу трубы, рассчитанные для одного и того же значения перепада давления и расхода жидкости, но разных значений показателя нелинейности. Отметим, что при этих условиях величина среднерасходной вязкости $\bar{\mu}$ будет оставаться постоянной.

Зависимость между консистенцией и среднерасходной вязкостью с учетом полученных ранее соотношений можно представить в виде

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{8n}{3n+1} \right)^n \bar{\mu}^n R^{1-n} \left| \frac{dp}{dx} \right|^{1-n}. \quad (33)$$

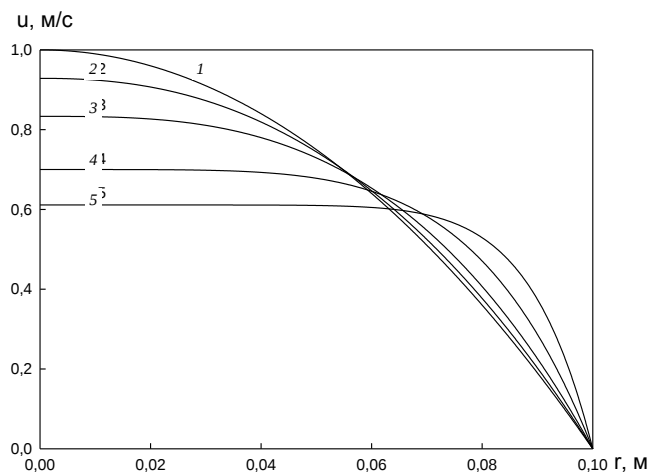


Рис. 3. Радиальное распределение скорости: $\bar{\mu} = 5 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $|dp/dx| = 2000 \text{ Па/м}$:

1 – $n = 1$ (ньютоновская жидкость, $k = \mu = 5 \text{ Па}\cdot\text{с}$); 2 – $n = 0,75$ ($k = 9,96 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,75}$); 3 – $n = 0,5$ ($k = 20 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$); 4 – $n = 0,25$ ($k = 41,11 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,25}$); 5 – $n = 0,125$ ($k = 60,6 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,125}$)

Из рис. 3 видно, что с уменьшением показателя нелинейности происходит уменьшение толщины динамического пограничного слоя, при этом градиент скорости вблизи стенки возрастает. В ядре потока, напротив, распределение скорости становится более равномерным. Поскольку расход жидкости при выбранных параметрах остается неизменным, скорость течения в ядре потока уменьшается, а в пограничном слое – возрастает.

На рис. 4–6 показана зависимость эффективной вязкости μ_{eff} от радиальной координаты r . Это распределение является типичным для псевдопластических сред и имеет вид гиперболы с вертикальной асимптотой на оси течения. В периферийной и пристеночной части течения эффективная вязкость характеризуется низкими значениями. Однако в окрестности оси течения, где градиент скорости невысокий, наблюдается значительный рост эффективной вязкости. На оси течения $\mu_{\text{eff}} \rightarrow \infty$. Увеличение эффективной вязкости псевдопластических сред с уменьшением скоростей сдвиговых деформаций в реологии объясняется процессами структурирования [28]. При малых скоростях сдвига происходит стягивание молекул полимера между собой, вследствие чего в потоке формируется область структурированного течения, характеризующаяся высокими значениями эффективной вязкости.

С увеличением скорости сдвига структурированность среды нарушается, молекулы ориентируются вдоль направления движения. В результате этого сопротивление среды ослабевает, что означает уменьшение эффективной вязкости.

С увеличением перепада давления интенсифицируются процессы разрушения структуры среды, что приводит к уменьшению эффективной вязкости и росту скорости потока (рис. 4).

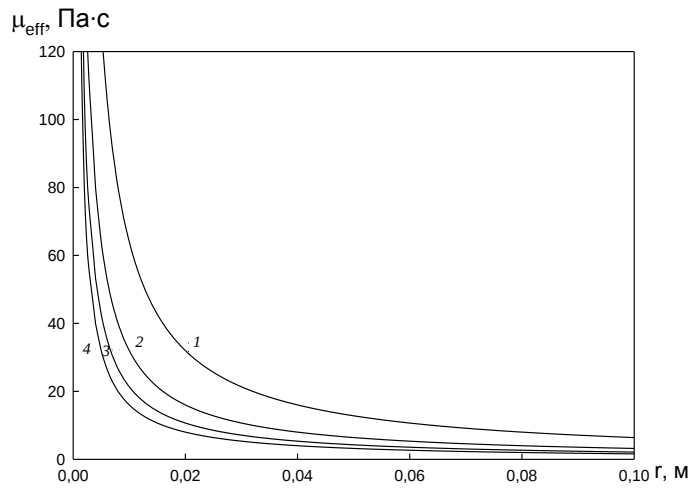


Рис. 4. Радиальное распределение эффективной вязкости: $n = 0,5$, $k = 12,65 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,5}$:

1 – $|dp/dx| = 500 \text{ Па/м}$; 2 – $|dp/dx| = 1000 \text{ Па/м}$; 3 – $|dp/dx| = 1500 \text{ Па/м}$; 4 – $|dp/dx| = 2000 \text{ Па/м}$

Увеличение значений параметра консистенции k приводит к росту эффективной вязкости во всей области течения. Однако если в периферийной и пристеночной областях этот рост является незначительным, то вблизи оси течения в области малых скоростей сдвиговых деформаций происходит существенное увеличение эффективной вязкости, связанное с загущением среды (рис. 5).

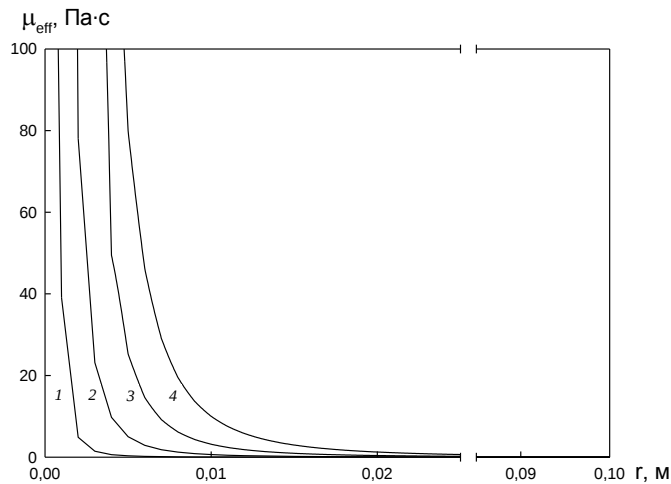


Рис. 5. Радиальное распределение эффективной вязкости: $n = 0,25$, $|dp/dx| = 2000 \text{ Па/м}$:

1 – $k = 2,5 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$; 2 – $k = 5 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$; 3 – $k = 7,5 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$; 4 – $k = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,25}$

На рис. 6 представлено радиальное распределение эффективной вязкости, рассчитанное для различных значений показателя нелинейности, но одних и тех же значений среднерасходной вязкости и перепада давления. Для значений показателя нелинейности, близких к единице, $n \approx 1$, радиальное распределение эффективной вязкости в пристеночной и периферийной областях течения близко к однородному.

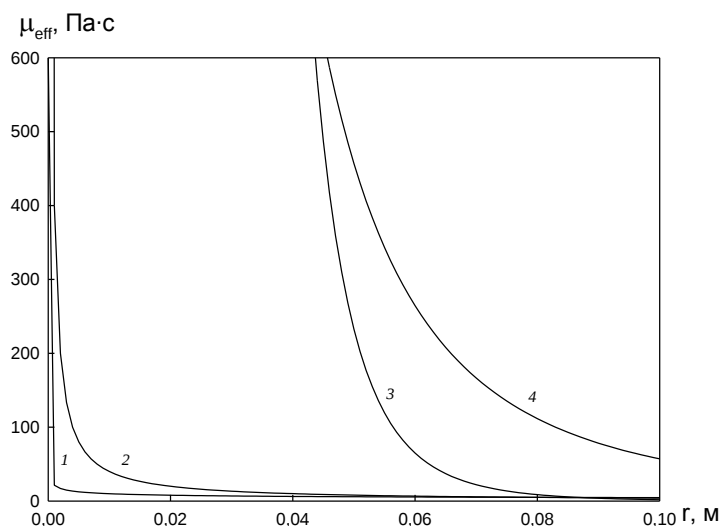


Рис. 6. Радиальное распределение эффективной вязкости: $\bar{\mu} = 5 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $|dp/dx| = 2000 \text{ Па/м}$:
 1 – $n = 0,75$ ($k = 9,96 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,75}$); 2 – $n = 0,5$ ($k = 20 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$); 3 – $n = 0,25$ ($k = 41,11 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,25}$); 4 – $n = 0,125$ ($k = 60,6 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,125}$)

В узкой области вблизи оси течения наблюдается резкий рост эффективной вязкости. С уменьшением показателя нелинейности n неньютоновские свойства среды становятся более выраженными. Значения эффективной вязкости в пристеночной зоне возрастают. При этом с уменьшением показателя нелинейности граница вязкого течения смещается от оси течения к стенке трубы. В пристеночной области с уменьшением n эффективная вязкость потока уменьшается. Таким образом, течение псевдопластических сред с малым значением показателя нелинейности характеризуется наличием высоковязкого ядра и узкой области пристеночного течения с невысокими значениями.

На рис. 7 показана зависимость значения среднерасходной вязкости $\bar{\mu}$ от перепада давления $|dp/dx|$, рассчитанная для различных значений реологических параметров.

Как видно из рисунка, величина среднерасходной вязкости в псевдопластических средах монотонно убывает с ростом перепада давления. Этот эффект наиболее выражен для низкоскоростных потоков, движущихся при малом перепаде давления. С увеличением значений $|dp/dx|$ жидкость становится более подвижной. Это приводит к уменьшению значений $\bar{\mu}$. Уменьшение вязкости

битумных дисперсных систем с ростом перепада давления объясняется особенностями их внутреннего строения. В неподвижном состоянии дисперсная фаза образует непрерывную структуру, обладающую определенной прочностью. При низких значениях $|dp/dx|$ течение жидкости происходит по тонким прослойкам между элементами твердофазной структуры [28]. Гидравлическое сопротивление в этом случае очень велико, что и обуславливает высокие значения вязкости при низких значениях перепада давления. При высоких значениях $|dp/dx|$ происходит разрушение коагуляционной структуры, приводящее к уменьшению вязкости. Прочность коагуляционной структуры дисперсных систем характеризуется показателем консистенции. Поэтому с увеличением консистенции среды k происходит рост среднерасходной вязкости.

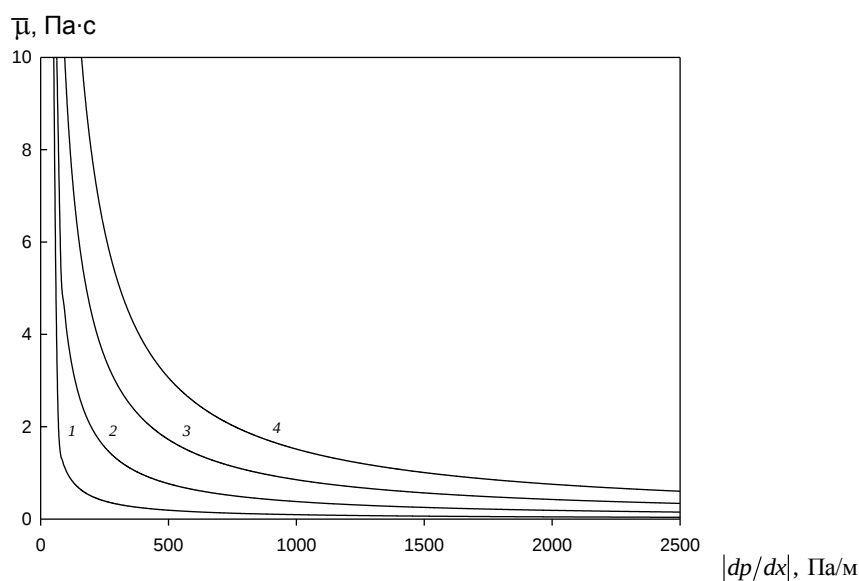


Рис. 7. Зависимость относительной величины среднерасходной вязкости $\bar{\mu}$ от перепада давления $|dp/dx|$, $n = 0,5$:
 1 – $k = 2,5 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$; 2 – $5 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$; 3 – $7,5 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$; 4 – $10 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$

На рис. 8 показано изменение коэффициента гидравлического сопротивления ζ с ростом перепада давления $|dp/dx|$ для различных значений консистенции k и показателя нелинейности n . Как видно из рисунка, при низких значениях $|dp/dx|$ неньютоновские свойства среды, обусловленные наличием внутренней структуры, приводят к значительному гидравлическому сопротивлению. С увеличением значений $|dp/dx|$ гидравлическое сопротивление потока уменьшается, что связано с разрушением структуры среды. С увеличением значений параметра консистенции k возрастает диссипация механической энергии потока, что приводит к росту гидравлического сопротивления.

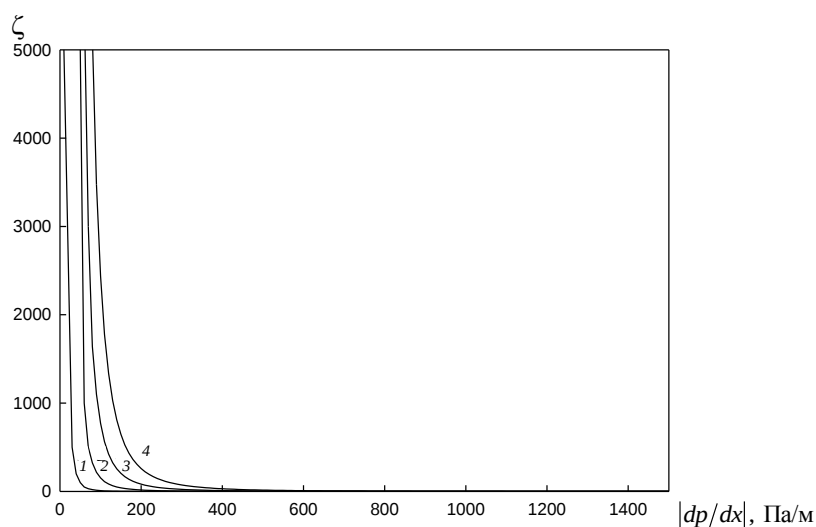


Рис. 8. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ζ от перепада давления $|dp/dx|$, $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, $n = 0,5$:
 1 – $k = 2,5 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$; 2 – $5 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$; 3 – $7,5 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$; 4 – $10 \text{ Па}\cdot\text{с}^{0,5}$

Закключение

С уменьшением показателя нелинейности происходит уменьшение толщины динамического пограничного слоя, при этом градиент скорости вблизи стенки возрастает. В ядре потока, напротив, распределение скорости становится более равномерным. При неизменном расходе жидкости с уменьшением показателя нелинейности скорость жидкости в ядре потока уменьшается, а в пограничном слое – возрастает.

Структурирование среды, наиболее заметно проявляющееся при малых значениях показателя нелинейности, приводит к тому, что скорость течения в ядре потока характеризуется практически однородным профилем, что характерно для пластического течения. Течение псевдопластических сред с малым значением показателя нелинейности характеризуется наличием высоковязкого ядра и узкой области пристеночного течения.

Распределение эффективной вязкости имеет вид гиперболы с вертикальной асимптотой на оси течения. В периферийной и пристеночной части течения эффективная вязкость характеризуется низкими значениями; в окрестности оси течения, где градиент скорости невысокий, наблюдается значительный рост эффективной вязкости. На оси течения $\mu_{\text{eff}} \rightarrow \infty$. С увеличением скорости сдвига происходит уменьшение эффективной вязкости.

С повышением консистенции среды k величина среднерасходной вязкости увеличивается. Этот эффект наиболее выражен для низкоскоростных потоков, движущихся при малом перепаде давления.

При низких значениях перепада давления неньютоновские свойства среды, обусловленные наличием внутренней структуры, приводят к значительному гидравлическому сопротивлению. С увеличением перепада давле-

ния гидравлическое сопротивление потока уменьшается, что связано с разрушением структуры среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Методические рекомендации* по проектированию жестких дорожных одежд. Москва : Информавтодор, 2004.
2. *Технические рекомендации* по устройству и приемке в эксплуатацию дорожных покрытий с учетом требований международных стандартов по ровности. ТР 134-03. Москва, 2003.
3. *Бабак О.Г., Старков Г.Б.* Применение модифицированных вяжущих в дорожном строительстве // *Дорожная техника и технологии*. 2001. № 5. С. 72–75.
4. *Горишенина Г.И., Михайлов Н.В.* Полимербитумные изоляционные материалы. Москва : Недра, 1967. 210 с.
5. *Кулижников А.М.* Требования к грунтам земляного полотна и подстилающего основания // *Автомобильные дороги*. 2012. № 5. С. 82–83.
6. *Ефименко С.В., Ефименко В.Н., Бадина М.В.* Некоторые особенности обоснования свойств прочности и деформируемости глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд // *Дороги и мосты*. 2016. № 35/1. С. 70–82.
7. *Churilin V., Efimenko S., Matvienko O., Bazuev V.* Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving // *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 216. EDP Sciences. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601011>
8. *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.
9. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Чурилин В.С.* Моделирование напряжений и деформаций дорожных покрытий // *Дороги и мосты*. 2016. № 2 (36). С. 139–153.
10. *Руденская И.М., Руденский А.В.* Органические вяжущие для дорожного строительства. Москва : Транспорт, 1984. 229 с.
11. *Гохман Л.М.* Применение полимерно-битумных вяжущих в дорожном строительстве // *Дорожная техника и технологии*. 2001. № 5. С. 65–70.
12. *Каганович Е.В., Карцева И.И., Измаилова Г.Г.* Полимерные модификаторы битума и асфальтобетона // *Вестник КаздорНИИ*. 2004. № 1 (2). С. 44–47.
13. *Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К.* Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вяжущих // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 2. С. 132–143.
14. *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.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *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. С. 012034.

19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. Москва : Химия, 1973. 432 с.
24. Грудников И.Б. Производство нефтяных битумов. Москва : Химия, 1983. 192 с.
25. Золотарев В.А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Харьков : ХНАДУ, 2014. 180 с.
26. Anderson A., Christensen D.W., Bahia H.U., Dongre R., Sharma M.G., Antle C.E., Button J. Strategic Highway Research Program Tech. Rep. SHRP-A-369. 1994.
27. Sybilski D. Non-newtonian viscosity of polymer-modified bitumens // Materials and Structures 1993. V. 26. P. 15–23. DOI:10.1007/BF02472233
28. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург : Профессия, 2007. 560 с.
29. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015.
30. Кутепов А.М., Полянин Л.Д., Запryanов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика : справочное пособие. Москва : Бюро Квантум, 1996.
31. Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. Москва : Наука, 2005.
32. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Москва: Мир, 1964.
33. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Сабылина Н.Р., Асеева А.Е., Суртаева А.А. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вяжущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 158–177.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1974.
41. Перминов А.В., Любимова Т.П. Устойчивость стационарного плоскопараллельного течения псевдопластической жидкости в плоском вертикальном слое // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 3. С. 270–278.

42. 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.
43. Матвиенко О.В. Численное исследование течения неньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8-2. С. 183–189.
44. 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.

REFERENCES

1. Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu zhestkih dorozhnykh odezhd [Recommendations for road pavement design]. Moscow: Informavtodor, 2004. (rus)
2. Tehnicheskie rekomendatsii po ustroystvu i priemkev jekspluataciju dorozhnykh pokrytij s uchetom trebovanij mezhdunarodnykh standartov po rovnosti [Technical recommendations for pavement operation with regard to requirements for international standards for evenness]. Moscow, 2003. (rus)
3. Babak O.G., Starkov G.B. Primeneniye modifitsirovannykh vyazhushchikh v dorozhnom stroitel'stve [Modified binders in road construction]. *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii*. 2001. No. 5. Pp. 72–75. (rus)
4. Gorshenina G.I., Mikhaylov N.V. Polimerbitumnyye izolyatsionnyye materialy [Polymer bitumen insulation materials]. Moscow: Nedra, 1967. 210 p. (rus)
5. Kulizhnikov A.M. Trebovaniya k gruntam zemlyanogo polotna i podstilayushchego osnovaniya [Requirements for subgrade soils]. *Avtomobil'nyye dorogi*. 2012. No. 5. Pp. 82–83. (rus)
6. Efimenko S.V., Efimenko V.N., Badina M.V. Nekotoryye osobennosti obosnovaniya svoystv prochnosti i deformiruyemosti glinistykh gruntov dlya proyektirovaniya dorozhnykh odezhd [Substantiation for strength and deformability properties of clay soils for road pavement design]. *Dorogi i mosty*. 2016. No. 35/1. Pp. 70–82. (rus)
7. Churilin V., Efimenko S., Matvienko O., Bazuev V. Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 216. DOI: 10.1051/mateconf/201821601011.
8. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Arutyunyan E.R. Matematicheskoye modelirovaniye sdvigoustoychivosti asfal'tobetonnykh pokrytij 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)
9. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Churilin V.S. Modelirovaniye napryazheniy i deformatsiy dorozhnykh pokrytij [Modeling of stresses and deformations of road pavements]. *Dorogi i mosty*. 2016. No. 2 (36). Pp. 139–153. (rus)
10. Rudenskaya I.M., Rudenskiy A.V. Organicheskiye vyazhushchiye dlya dorozhnogo stroitel'stva [Organic binders for road construction]. Moscow: Transport, 1984. 229 p. (rus)
11. Gokhman L.M. Primeneniye polimerno-bitumnykh vyazhushchikh v dorozhnom stroitel'stve [Application of polymer-bitumen binders in road construction]. *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii*. 2001. No. 5. Pp. 65–70. (rus)
12. Kaganovich Ye.V., Kartseva I.I., Izmailova G.G. Polimernyye modifikatory bituma i asfal'tobetona [Bitumen and asphalt concrete polymer modifiers]. *Vestnik KazdorNII*. 2004. No. 1 (2). Pp. 44–47. (rus)
13. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Chislennoye issledovaniye perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennykh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh [Numerical study of transition to turbulent flow conditions of internal twisted streams of bituminous binders]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
14. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dul'zon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V. Chislennoye issledovaniye struktury techeniya i teploobmena pri zakruchennom techenii bitumno-dispersnykh sistem v tsilindricheskikh kanalakh [Numerical investigation of flow structure and

- heat exchange of swirling flows of disperse bitumen systems in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2 (43). Pp. 80–93. (rus)
15. Matvienko O.V. Issledovaniye teploobmena i formirovaniya turbulentnosti vo vnutrennem zakruchennom potoke zhidkosti pri nizkikh chislakh Reynol'dsa [Heat exchange and turbulence formation in internal fluid eddy current at low Reynolds number]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2014. V. 87. No. 4. Pp. 908–918. (rus)
 16. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Smirnova N.G., Pushkareva G.V., Dul'zon N.K. Issledovaniye smesheniya koaksial'nykh zakruchennykh potokov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [A study of mixing coaxial swirling flows for preparation of asphalt dispersion systems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 3 (44). Pp. 123–134. (rus)
 17. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Turkasova N.G., Baygulova A.I. Issledovaniye protsessa modifikatsii bituma v inzhektorom smesitele [Investigation of bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
 18. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Numerical investigation of Herschel-Bulkley fluids mixing. In: *IOP Conf. Ser. "Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering"*, 2014; *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists 'Advanced Materials in Construction and Engineering'*, 2015. Pp. 012034.
 19. Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuyev V.P., Yevtyushkin Ye.V. Chislennoye modelirovaniye raspada turbulentnoy strui v sputnom zakruchennom potoke [Numerical simulation of turbulent jet decay in satellite eddy current]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2006. V. 49. No.6. Pp. 96–107. (rus)
 20. Bazuyev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsessa modifikatsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore [Simulation of bitumen modification process in cavitation-mixing dispersant]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
 21. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Chislennoye issledovaniye protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve [Computational investigation of cavitation in cavitation disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4 (45). Pp. 231–245. (rus)
 22. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Eksperimental'noye issledovaniye protsessa kavitatsii v tekhnologicheskikh ustroystvakh [Experimental study of cavitation in different apparatuses]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 165–176. (rus)
 23. Gun R.B. Neftyanyye bitumy [Oil bitumen]. Moscow: Khimiya, 1973. 432 p. (rus)
 24. Grudnikov I.B. Proizvodstvo neftnykh bitumov [Oil bitumen production]. Moscow: Khimiya, 1983. 192 p. (rus)
 25. Zolotarev V.A. Dorozhnyye bitumnyye vyazhushchiye i asfal'tobetonny [Road bitumen binders and asphalt concrete]. Kharkov: KHNADU, 2014. 180 p. (rus)
 26. Anderson A., Christensen D.W., Bahia H.U., Dongre R., Sharma M.G., Antle C.E., Button J. Strategic highway research program. Technical Report SHRP-A-369. 1994.
 27. Sybilski D. Non-Newtonian viscosity of polymer-modified bitumen. *Materials and Structures*. 1993. V. 26, Pp. 15–23. DOI:10.1007/BF02472233
 28. Malkin A.Ya., Isayev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya [Rheology: concepts, methods, applications]. St.-Petersburg: Professiya, 2007. 560 p. (rus)
 29. Matviyenko O.V., Unger F.G., Bazuyev V.P. Matematicheskiye modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mathematical models of production processes for preparation of bituminous dispersion systems]. Tomsk: TSUAB, 2015. (rus)
 30. Kutepov A.M., Polyinin L.D., Zapryanov Z.D., Vyaz'min A.V., Kazenin D.A. Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoye posobiye [Chemical hydrodynamics: reference book]. Moscow: Byuro Kvantum, 1996. (rus)
 31. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgiyevskiy D.V. Vyazkoplasticheskiye techeniya: dinamicheskii khaos, ustoychivost' i peremeshivaniye [Viscoplastic currents: dynamic chaos, stability and mixing]. Moscow: Nauka, 2005. (rus)
 32. Wilkinson U.L. Nen'yutonovskiye zhidkosti [Non-Newton liquids]. Moscow: Mir, 1964. (rus)
 33. 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 arkhitekturnostroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 20. No. 3. Pp. 158–177. (rus)
34. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Dul'zon N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka vyazkoplachesticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of viscoplastic liquid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2014. V. 87. No. 5. Pp. 1129–1137. (rus)
35. Matvienko O.V., Yevtyushkin E.V. Matematicheskoye issledovaniye separatsii dispersnoy fazy v gidrotsiklone pri oчитке vyazkoplachesticheskikh burovyykh rastvorov [Mathematical study of disperse phase separation in hydrocyclone in viscoplastic drilling fluid purification]. *Inzhenerno-Fizicheskiy zhurnal*. 2011. V. 84. No. 2. Pp. 243–252. (rus)
36. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti Balkli–Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of Balkley-Gershel pseudoplastic liquid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2019. V. 92. No. 1. Pp. 215–226. (rus)
37. 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 Balkley-Gershel dilatant fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2019. V. 92. No. 6. Pp. 2641–2651. (rus)
38. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of dilatant fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2014. V. 87. No. 1. Pp. 192–199. (rus)
39. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2011. V. 84. No. 3. Pp. 544–547. (rus)
40. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Nauka, 1974. (rus)
41. Perminov A.V., Lyubimova T.P. Ustoychivost' statsionarnogo ploskoparallel'nogo techeniya psevdoplasticheskoy zhidkosti v ploskom vertikal'nom sloye [Stability of stationary plane-parallel flow of pseudoplastic fluid in flat vertical layer]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2014. V. 7. No. 3. Pp. 270–278. (rus)
42. Matvienko O.V. Issledovaniye ustanovivshegosya techeniya psevdoplasticheskoy zhidkosti, opisyyvayemoy model'yu Sisko, v tsilindricheskoy trube [Established flow of pseudoplastic liquid in cylindrical tube in terms of the Sisko model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2018. No. 55. Pp. 99–112. (rus)
43. Matvienko O.V. Chislennoye issledovaniye techeniya nen'yutonovskikh zhidkostey v tsilindricheskom kanale [Numerical study of non-Newtonian fluids in cylindrical channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2014. V. 57. No. 8-2. Pp. 183–189. (rus)
44. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuyev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyr'ka v zakruchennom potoke nelineynno-vyazkoy zhidkosti [Bubble dynamics in swirling flow of nonlinear and viscous liquids]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 144–156. (rus)

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.

Базуев Виктор Павлович, канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Черкасов Илья Сергеевич, магистрант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Литвинова Алёна Евгеньевна, магистрант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

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.

Viktor P. Bazuev, PhD, Senior Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Ilya S. Cherkasov, MSc, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Aleona E. Litvinova, MSc, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

УДК 624:69

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-193-204

Э.М. КАРИМОВ,
Ошский технологический университет

ВЛИЯНИЕ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ V ДОРОЖНО-КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ КЫРГЫЗСТАНА

В статье представлены результаты исследований деформаций земляного полотна, приводящих к потере устойчивости дорожной конструкции на участке автомобильной дороги Ош – Исфана, находящемся в южном регионе Кыргызстана. Увлажнение грунтов откосной части земляного полотна происходит в основном за счёт атмосферных осадков, поэтому в работе отражена взаимосвязь между просадочными деформациями земляного полотна и атмосферными осадками в условиях V дорожно-климатической зоны. Исследованиями выявлено влияние влажности грунтов на их физико-механические характеристики, а также определены критические значения влажности для каждого исследуемого участка грунта по глубине, на котором может произойти деформация. На обследованном участке автомобильной дороги определены геологическое строение и некоторые параметры физико-механических свойств грунтов. В работе отражены оценка и прогнозирование просадочных явлений. Результаты исследований будут полезны при проектировании и реконструкции автомобильных дорог, имеющих сложные геологические условия на территории Республики Кыргызстан.

Ключевые слова: автомобильная дорога; земляное полотно; глинистые грунты; влажность грунта; просадка; деформация; атмосферные осадки; расчетный период; водно-тепловой режим; критическая влажность.

Для цитирования: Каримов Э.М. Влияние водно-теплого режима на техническое состояние земляного полотна автомобильных дорог в условиях V дорожно-климатической зоны Кыргызстана // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 193–204.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-193-204

Е.М. KARIMOV,
Osh Technological University

IMPACT OF WATER AND TEMPERATURE CONDITIONS ON SUBGRADE IN ROAD-BUILDING CLIMATIC ZONE V IN KYRGYZSTAN

This paper presents research results of subgrade deformations leading to the loss of road stability on the Osh-Isfana road section in the South of Kyrgyzstan. The soil humidity of the sloping subgrade area occurs due to precipitation, so the paper considers the relationship between the subgrade settlement and atmospheric precipitation in the road-climatic zone V. The influence of the soil humidity on its physical and mechanical properties are determined as well as the critical values of humidity for each investigated area, when deformation can occur. The geological structure and parameters of physical and mechanical properties of soils are determined in the road section at issue. Subgrade settlement is evaluated and predicted in this work. The results can be used in road design and reconstruction with regard to the geological conditions of the Kyrgyz Republic.

Keywords: road; subgrade; clay soil; soil humidity; settlement; deformation; precipitation; base period; water and temperature conditions.

For citation: Karimov E.M. Vliyanie vodno-teplovogo rezhima na tekhnicheskoe sostoyanie zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog v usloviyakh V dorozhno-klimaticheskoi zony Kyrgyzstana [Impact of water and temperature conditions on subgrade in road-building climatic zone V in Kyrgyzstan]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 193–204.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-193-204

Хорошо известно, что одной из основных причин формирования местных просадочных деформаций является вода и вызванное ею переувлажнение грунтов. При избыточном увлажнении прочность и плотность грунтов снижаются, что обуславливает уменьшение сопротивляемости дорожных конструкций к нагрузкам от автотранспорта. Исследование просадочности грунтов имеет большое практическое значение при проектировании линейных сооружений на лёссовидных грунтах.

Обследованный участок дороги находится в V дорожно-климатической зоне (ДКЗ) Республики Кыргызстан. Наиболее важные метеорологические факторы для V ДКЗ показаны на рис. 1 и 2. Основной чертой ландшафта, характерной для условий V ДКЗ, является его ступенчатое строение, т. е. ярусность по вертикали. Межгорные равнины оконтуриваются зоной низких предгорий. Юг Кыргызстана является частью туранской фации, расположенной на абсолютных высотах 500–5000 м над уровнем моря. Почвообразующими породами межгорных долин, на которых сформировались серозёмы туранские, являются лёссовидные суглинки, конгломераты и галечники четвертичного периода, в составе которых имеются карбонаты и другие легкорастворимые соли. На склонах гор, окружающих Ферганскую долину, преобладают древние палеозойские породы, состоящие в основном из известняков, сланцев и песчаников. Здесь чётко проявляется высотная поясность почвенного покрова. В Ферганской долине серозёмы занимают почти все равнинные пространства и предгорья. Это связано с расположением территории Южного Кыргызстана в субтропическом климатическом поясе, где атмосферные осадки выпадают в основном в весенний и осенний периоды года. Поэтому зима умеренно тёплая, а лето очень жаркое и засушливое. Эта дорожно-климатическая зона характеризуется засушливым климатом и засоленными грунтами, также включает в себя пустынно-степную и пустынную естественно-историческую зоны. Расположена она в значительной своей части на азиатской территории [1]. В зависимости от степени увлажнения суглинистые грунты могут находиться в твердом, пластичном или текучем состоянии. Отражённые характеристики климата необходимо учитывать при обосновании возможности строительства на глинистых грунтах. Влагоемкость грунтов, т. е. то количество воды, которое грунт удерживает в себе во взвешенном состоянии в основном капиллярными силами, также различна в грунтах, характерных для V ДКЗ, причем в суглинках она в три раза выше, чем в песках. Вододерживающая способность грунтов различна: глинистые грунты удерживают до 91,5 % влаги, в то время как песчаные грунты только 6,5 % (супеси имеют

промежуточное значение – 42,7 %) [2]. Отсюда можно сделать вывод, что покровные отложения, состоящие из суглинков, быстро переувлажняются и, следовательно, теряют несущую способность.

В гидрогеологическом отношении территория V ДКЗ Республики Кыргызстан характеризуется распространением подземных вод в лёссовых толщах и аллювиальных отложениях, залегающих на различных глубинах. Увлажнение грунта на обследуемом участке происходит только за счет инфильтрации атмосферных осадков.

В слоях дорожной одежды и земляного полотна одновременно происходит несколько процессов: теплообмен увлажненного материала с приземным воздухом, диффузия пара и воды в порах материала, влагообмен между дорожным покрытием и приземным воздухом, инфильтрация осадков через трещины в одежду и полотно, инфильтрация воды в полотно со стороны обочины и др. [3].

Особенности распределения атмосферных осадков в Кыргызстане определяются его месторасположением в глубине обширного материка, а также сложностью горного рельефа. При этом важную роль в их распределении по территории играют орографические условия [4–6]. В связи с этим отмечаем, что распределение атмосферных осадков на территории весьма неравномерное. Отдельные районы получают значительное количество влаги (1500 мм в год). В ряде районов количество атмосферных осадков невелико (150–200 мм в год).

Основная характеристика количества атмосферных осадков – их годовая сумма. Однако этой характеристики недостаточно: необходимо знать и внутригодовое распределение осадков, которое может быть очень различным, что влияет на величину и режим атмосферного увлажнения почвы [7]. Выпавшая сумма осадков в виде графического изображения за 2018 г. приведена на рис. 1. Из графика видно, что на летние месяцы приходится минимум осадков или они почти отсутствуют, а максимальное количество осадков приходится в основном на апрель и май.

Долинно-предгорный пояс, имеющий высотные отметки от 500–600 до 900–1200 м, характеризуется жарким летом (до 28 °С), умеренно-прохладной и бесснежной зимой с большим дефицитом осадков. Этот пояс, особенно в Приферганье, имеет черты субтропического климата. Средняя температура июля +20...25 °С, января –4...–7 °С. Предельно высокая температура летом достигает 44 °С, с ростом высоты уменьшается до 27...30 °С. Абсолютные минимумы зимой составляют –22...–30 °С, местами –40 °С. Годовая температура в V ДКЗ в графическом виде приведена на рис. 2. Дорожное полотно на изучаемом участке автомобильной дороги сложено лёссовидными суглинками аллювиально-пролювиальными средне-верхне-четвертичного возраста (арQ₂₋₃) с прослоями и линзами песков различной крупности, а также насыпными грунтами глинисто-песчаного состава (tQ₄). Толщина слоев превышает 10 м. Лёссовидные суглинки маловлажные, твердые, высокопористые, сильнопросадочные при замачивании. Местами в толще суглинков наблюдается косая слоистость с падением на север-северо-западном направлении.

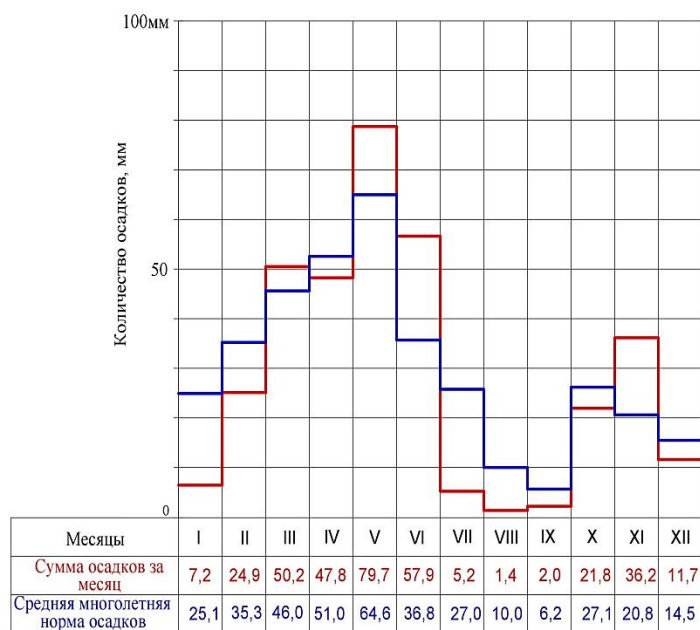


Рис. 1. График изменения количества атмосферных осадков на 2018 г. в Наукатском районе Ошской области

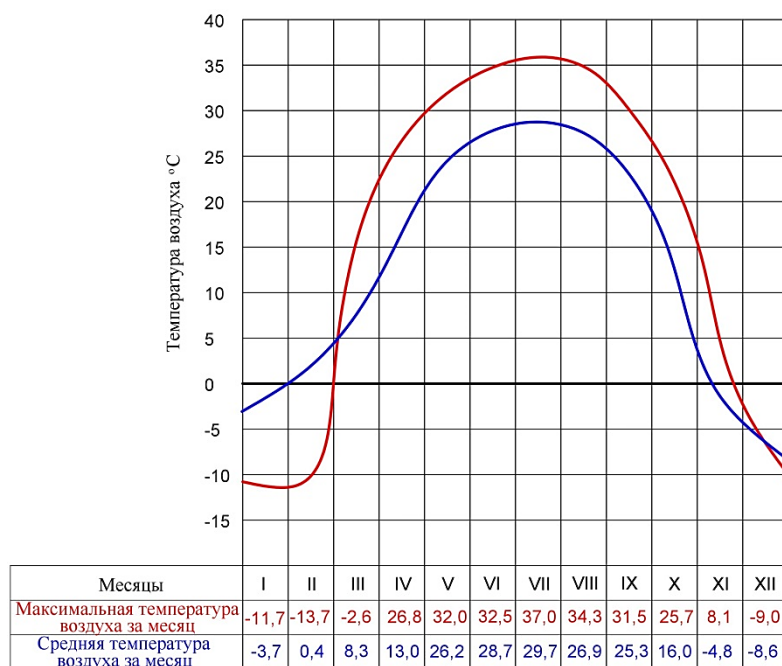


Рис. 2. График изменения температуры воздуха на 2018 г. в Наукатском районе Ошской области

При первичном строительстве дороги (50-е гг. прошлого столетия) осуществлены работы по подготовке дорожного полотна на склоне с образованием выемки и насыпи в глинистых грунтах. При этом часть дорожного полотна, вдоль оси дороги, приходится на искусственное основание, представленное насыпными грунтами (tQ_4) суглинисто-песчаного состава.

В процессе строительства естественные грунты подвергаются различным воздействиям (перемещение, смешивание, уплотнение, увлажнение или высушивание и т. д.), становятся техногенными и существенно меняют свои свойства [8]. 23-й километр автомобильной дороги Ош – Исфана реконструирован в 2014 г. При реконструкции дороги созданы отрезки дорожного полотна с относительно свежими насыпями, которые не были уплотнены должным образом, с соблюдением технологии укладки искусственных оснований. С 2014 по 2017 г. на изучаемом участке дороги произошли просадочные деформации дорожного полотна, выявленные с помощью проведённых инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий [9, 10]. Эти деформации были вызваны замачивающим воздействием инфильтрируемых ливневых и талых вод на просадочные и насыпные грунты. С 2018 г. на участке наблюдалось отсутствие деформаций на теле откоса. Основываясь на результатах выполненных инженерно-изыскательских работ, пришли к выводу о том, что с этого времени наступил период стабилизации.

Условие обеспечения стабильности свойств искусственно уплотнённого грунта – это сохранение во времени достигнутых в результате уплотнения показателей физико-механических, водно-физических и криогенных свойств [11]. Приведенные в табл. 1, 2 результаты проведённых в 2018 г. исследовательских работ можно считать показателями послестабилизационного периода.

Таблица 1

Основные характеристики физико-механических свойств

Наименование места отбора	Интервал отбора, м	Удельный вес, т/м^3	Плотность, т/м^3	Плотность в сухом состоянии т/м^3	Природная влажность, %	Степень влажности	Пористость, %	Коэффициент пористости	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности, %	Показатель текучести	Плотность соответств. полному водонасыщению, %
		γ	ρ	ρ_d	W	S_r	n	e	W_T	W_P	I_P	I_L	W_{saf}
ш1	0,70	2,71	1,28	1,17	9,7	0,20	56,8	1,31	29,5	18,2	11,6	< 0	1,68
	1,30	2,72	1,21	1,12	7,9	0,15	58,8	1,42	30,2	16,8	13,4	< 0	1,65
	1,70	2,72	1,31	1,19	10,8	0,21	56,3	1,28	29,9	17,8	12,1	< 0	1,70

Таблица 2

Статические прочностные характеристики грунтов

Наименования материалов	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, МПа	Коэффициент трения
Суглинок тверд.	32	0,4	0,625
Суглинок тверд.	25	0,233	0,575

При оценке местной устойчивости откосов горных дорог определяющими факторами являются крутизна склона и откоса, экспозиция склона, влажность грунта, гранулометрический состав грунта, плотность грунта, прочность грунта, температурные колебания воздуха [12].

К основным сооружениям, наиболее подверженным воздействию климатических условий, относятся: земляное полотно, дорожная одежда, водоотводные сооружения, путепроводы, тоннели и подпорные стенки, которые обеспечивают эксплуатацию дороги в любых природно-климатических условиях. Глубокое различие теплообеспеченности и увлажненности рассмотренных поясов обуславливает формирование различного сочетания зонально-геологических факторов в их границах и определяет принципиальное различие инженерно-геологических условий этих территорий [13].

На поврежденных деформациями участках откосов дороги пробурены скважины, пройдены шурфы, отобраны образцы грунтов ненарушенной структуры (монолиты) на различных глубинах (показаны на рис. 3) и проведены лабораторные испытания на базе Ошского филиала ОАО «Институт Кыргыз ГИИЗ». Чтобы судить о размерах будущей осадки грунта, установлена зависимость изменения пористости грунта от испытываемого им давления (табл. 3). Исследование зависимости выполнено лабораторным методом в соответствии с ГОСТ 23161–2012. Выявление просадочности грунтов имеет большое практическое значение при проектировании различных сооружений на лёссовидных грунтах. Так для исследования компрессионных свойств грунта применяли компрессионный прибор КПП-1.

С точки зрения проектирования ремонтных работ представляет интерес изучение физико-механических свойств грунтов на глубине в среднем 1,5–2,0 м, поэтому в табл. 2 приведены статические прочностные характеристики этого слоя грунта. Верхний слой грунтов примерно до глубины 1,00 м в изучаемом районе претерпевает изменения в течение года. Воздействие как положительных, так и отрицательных температур отражается на сезонном изменении влажности и плотности.

Наименьшие значения деформационных и прочностных характеристик наблюдаются в апреле – мае, когда заканчивается влагонакопительный период года, как показано на рис. 1. В это время дорожная конструкция обладает наименьшей прочностью, поэтому в табл. 1 приводятся данные, полученные путем лабораторных испытаний в мае 2018 г. Данный период принимается за расчетный в работе дорожной одежды.



Рис. 3. Процесс отбора монолитов глинистого грунта из откосной части земляного полотна для последующих лабораторных испытаний

Таблица 3

**Расчет суммарной величины просадки грунта от собственного веса
для определения типа грунтовых условий по просадочности**

№№ порядковые	Шурф №1 май											
	Интервал отбора монолитов, м	Мощность выделенного слоя, Н в см	Коэффициент пористости, e	Плотность в сухом состоянии, ρ^d , т/м ³	Плотность водонасыщ. грунта ρ_{sat}	Давление на водонасыщ. грунт от собствен. веса $P=Q_{zg}$, кПа (кгс/см ²)	Давление на водонасыщ. грунт от собствен. веса в середине слоя	Относит. просадочность грунта при давл. от собствен. веса и полном водонасыщ. E_{sl}	Толщина зоны просадки от собс. веса грунта, h_{sig}	Относительная просадочность j го слоя E_{slj}	Просадка от собствен. веса кажд. выделен. слоя грунта, S_{sl} , 2см	Тип грунтовых условий по просадочности
1	0,7	100	1,316	1,17	1,68	0,084	0,042	-	-	-	-	
2	1,3	60	1,429	1,12	1,65	0,099	0,217	0,005	6	0,011	0,06	
3	1,7	40	1,286	1,19	1,70	0,068	0,301	0,026	40	0,020	0,80	
4												
5										Сумма:	0,86	I

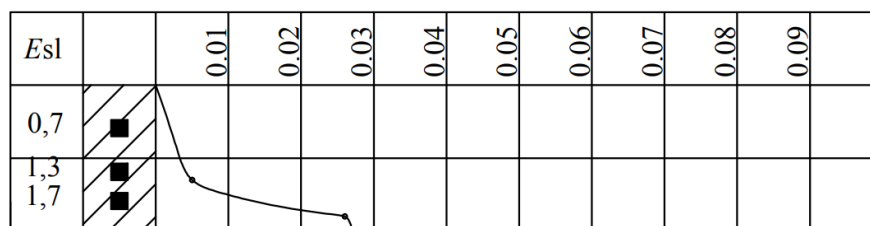


График изменения относительной просадочности по глубине шурфа № 1

Значительная часть влаги, поступившей в почву, возвращается обратно в атмосферу в парообразном состоянии. Этот возврат может происходить путем испарения. Процессы испарения в общем виде следует рассматривать в связи с тепловым балансом.

Количество тепла, которое расходуется на нагревание почвы (годовой теплооборот), находится в прямой зависимости от годовой амплитуды температуры воздуха (табл. 4).

Таблица 4

Годовой теплооборот [7]

Амплитуда температуры воздуха, °С	10	15	20	25	30	40	50
Теплооборот (сумма расхода и прихода) почвы, ккал/см ²	1,8	2,8	3,7	4,6	5,5	7,7	9,2

Как показано на рис. 2, до середины мая повышается суммарное количество осадков, которое превышает сумму испарения, а с начала июня устанавливается обратное соотношение. После достижения максимальной величины в начале мая показатели влажности грунта начинают быстро уменьшаться [7].

Исходя из анализа общей картины природно-климатических условий, можно сделать вывод, что наряду с суммарной солнечной радиацией, температурой воздуха, направлением и скоростью ветра показатели влажностного режима относятся к числу наиболее важных климатических факторов, воздействие которых на инженерные сооружения различного назначения оказывается значительным [14]. В весеннее время дорожные конструкции подвергаются различным деформациям, связанным с оттаиванием грунтов земляного полотна, при этом грунты в этот период являются наиболее увлажненными и разуплотненными. Инсоляция и нагрев поверхности дороги весной создают поток тепла, проникающий в дорожную конструкцию, который приводит к постепенному просыханию самых верхних слоев земляного полотна. При этом до полного оттаивания влажность талого грунта резко возрастает, плотность его уменьшается, снижаются деформационные (модуль упругости) и прочностные характеристики (угол внутреннего трения и сцепления). Интервал отбора проб грунта в течение календарного года подбирали в зависимости от глубины проникновения влаги (см. табл. 1). Анализ свойств образцов показал следующее: интервал изменения влажности грунта при глубине 0,70 м составил 9,7 %, в интервале глубин 0,70–1,30 м – 7,9 % и 10,8 % при глубине 1,70 м и более. Таким образом, выявлены интервалы глубин, где обязательно должны быть соблюдены требования, обеспечивающие регулирование водостока, а именно разработаны и установлены водосточные и водоотводящие устройства и системы.

Природная влажность грунтов V ДКЗ колеблется по сезонам года в довольно значительных пределах в соответствии с водно-тепловым режимом данного района. По мере заполнения пор водой сопротивляемость грунта нагрузкам уменьшается, и по достижении полного заполнения, что соответствует влажности верхнего предела пластичности, сопротивление грунта является минимальным.

Влажность является критической величиной в водном режиме грунта и входит в расчетные формулы по определению прочности и водостойкости земляных сооружений. Эта же влажность, как и максимальная молекулярная влагоемкость, является функцией гранулометрического состава грунта и степени насыщенности его поглощающего комплекса [15].

Критическую влажность можно определить по формуле [16]

$$W_{кр} = W_t - (0,2-0,7)I_p,$$

где W_t – влажность грунта в текущем состоянии; I_p – число пластичности.

Эти расчеты позволяют прогнозировать степень устойчивости склонов, сложенных лёссовидными грунтами, при комплексной нагрузке на которые возводят гидротехнические, горнорудные, жилищные, дорожные и другие сооружения [16].

Для каждой глубины грунта (см. табл. 1) определяем критическую влажность:

$$\begin{aligned}
& \text{– для } 0,7 \text{ м} \quad W_{кр} = W_t - (0,2-0,7)I_p = 29,5 - 0,2 \cdot 11,6 = 27,18, \\
& \quad \quad \quad W_{кр} = W_t - (0,2-0,7)I_p = 29,5 - 0,7 \cdot 11,6 = 21,38; \\
& \text{– для } 1,3 \text{ м} \quad W_{кр} = W_t - (0,2-0,7)I_p = 30,2 - 0,2 \cdot 13,4 = 27,52, \\
& \quad \quad \quad W_{кр} = W_t - (0,2-0,7)I_p = 30,2 - 0,7 \cdot 13,4 = 20,82; \\
& \text{– для } 1,7 \text{ м} \quad W_{кр} = W_t - (0,2-0,7)I_p = 29,9 - 0,2 \cdot 12,1 = 27,48, \\
& \quad \quad \quad W_{кр} = W_t - (0,2-0,7)I_p = 29,9 - 0,7 \cdot 12,1 = 21,43.
\end{aligned}$$

Заключение

Таким образом, для исследуемой V дорожно-климатической зоны было установлено, что по степени влажности грунты маловлажные; по консистенции, характеризуемой показателем текучести, суглинки твердые; по коэффициенту пористости – высокопористые.

Из анализа данных лабораторных испытаний следует, что влажность грунта недостаточна, т. к. отобранные образцы грунтов находятся в твердом состоянии. При такой влажности суглинистые грунты в инженерных сооружениях довольно устойчивы (см. табл. 2). Это подтверждают данные, полученные при расчете суммарной величины просадки грунта от собственного веса и для определения типа грунтовых условий по просадочности (см. табл. 3).

Вместе с тем по данному исследованному объекту можно сделать и более общие выводы. Для решения многих инженерных задач, связанных с проектированием и строительством автомобильных дорог в сложных условиях, большое значение имеет расчетная влажность грунтов. С ее учетом определяется модуль упругости грунта, прогнозируется влияние пучинообразования, регулируется водно-тепловой режим дорожной конструкции.

Прочность грунтов в рабочей зоне грунтовых оснований и полотна весьма существенно зависит от их влажности. Поэтому изучение колебаний влажности в естественно залегающем грунте является необходимым для решения вопроса об устойчивости грунтовых оснований и полотна.

Для каждого исследуемого слоя грунта определена критическая влажность.

Только правильное определение источников увлажнения территории строительства обеспечит правильность оценки этой величины. В горной местности требуется комплексная оценка источников увлажнения, поскольку кроме влияния поверхностных и подземных вод следует учитывать влияние воды, поступающей со склонов гор. Комплексная оценка источников увлажнения в горной местности на участке проектируемой дороги обеспечит правильность назначения устройства водосточных канав и водоотводящих систем. Это поможет продлить эксплуатационный срок службы автомобильных дорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Золотарь И.А., Пузакова Н.А., Сиденко В.М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Москва : Транспорт, 1971. 415 с.
2. Леонович И.И., Вырко Н.П. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Минск, 2013. 32 с.
3. Сиденко В.М. Расчет регулирования водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна. Москва : Автотрансиздат, 1962. 113 с.

4. Маданбеков Н.Ж., Турдубай уулу С., Исаков Р.Б., Омурбек уулу Р. Характеристики дорожно-климатического районирования // Вестник КГУСТА. 2015. № 2. С. 6–11.
5. Магомедов М.М. Горные дороги. Особенности проектирования, строительства и эксплуатации на примере Дагестана. Москва : Техполиграфцентр, 2006. 247 с.
6. Виноградский А.К. Дорожное районирование. Москва : Транспорт, 1989. 95 с.
7. Роде А.А. Водный режим почв и его регулирование. Москва : Изд-во АН СССР, 1963. 117 с.
8. Ефименко С.В., Бадина М.В. Дорожное районирование территории Западной Сибири. Томск : Изд-во Том гос. архит.-строит. ун-та, 2014. 244 с.
9. Каримов Э.М., Мирзалиев М. Осадки полотна автомобильных дорог на участках со сложными инженерно-геологическими условиями // Вестник КГУСТА. 2016. № 2 (52). С. 21–26.
10. Каримов Э.М., Тешаев Э.А., Эркали уулу У. Оценка устойчивости нагорных склонов // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 12 (93). С. 93–95.
11. Афиногенов О.П., Ефименко С.В., Афиногенов А.О. Совершенствование методов проектирования автомобильных дорог на основе дифференциации районирования. Кемерово : ООО «Офсет», 2015. 364 с.
12. Кыдыралиева Г.А. Оценка влияния водно-физических свойств грунта на его сопротивляемость сдвигу // Вестник КГУСТА. 2011. № 3. С. 29–33.
13. Федюк Р.С., Козлов П.Г., Мочалов А.В., Тимохин А.М. Необходимость актуализации дорожно-климатического районирования юга Дальнего Востока // Вестник СибАДИ. 2015. № 4 (44). С. 90–100.
14. Ефименко С.В., Бадина М.В. Учет особенностей природно-климатических условий при дорожно-климатическом районировании Западной Сибири // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2. С. 204–213.
15. Бируля А.К., Бируля В.И., Носич И.А. Устойчивость грунтов дорожного полотна в степных районах. Москва : Дориздат, 1951. 176 с.
16. Кузьминов М.П. Механика лессовых грунтов Средней Азии. / Науч.-произв. объединение «Узбекгидрогеология». Ташкент : Фан, 1976. 143 с.

REFERENCES

1. Zolotar I.A., Puzakova N.A., Sidenko V.M. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd [Water and temperature conditions of subgrade soil and road pavements]. Moscow: Transport, 1971. 415 p. (rus)
2. Leonovich I.I., Brightly N.P. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog [Water and temperature conditions of subgrade soil]. Minsk, 2013. 32 p. (rus)
3. Sidenko V.M. Raschet regulirovaniya vodno-teplovogo rezhima dorozhnykh odezhd i zemlyanogo polotna [Calculation of water and temperature conditions of subgrade soil and road pavements]. Moscow: Avtotransizdat, 1962. 113 p. (rus)
4. Madanbekov N.Zh., Turdubay uulu S., Isakov R.B., Omurbek uulu R. Kharakteristiki dorozhno-klimaticheskogo raionirovaniya [Characteristics of road-building climatic zoning]. Vestnik KGUSTA. 2015. No. 2. Pp. 6–11 p. (rus)
5. Magomedov M.M. Gornye dorogi. Osobennosti proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii na primere Dagestana. [Mountain roads. Road design, construction and operation in Dagestan]. Moscow: Tekhpolygrftsentr, 2006. 247 p. (rus)
6. Vinogradsky A.K. Dorozhnoe raionirovanie [Road zoning]. Moscow: Transport, 1989. 95 p. (rus)
7. Rode A.A. Vodnyi rezhim pochv i ego regulirovanie. [Water regime of soils and its regulation]. Moscow: AN SSSR, 1963. 117 p. (rus)
8. Efimenko S.V., Badina M.V. Dorozhnoe raionirovanie territorii Zapadnoi Sibiri [Road zoning in West Siberia]. Tomsk: TSUAB, 2014. 244 p. (rus)
9. Karimov E.M., Mirzaliev M. Osadki polotna avtomobil'nykh dorog na uchastkakh so slozhnymi inzhenerno-geologicheskimi usloviyami [Subgrade precipitations in areas with complicated engineering and geological conditions]. Vestnik KGUSTA. 2016. No. 2 (52). Pp. 21–26. (rus)
10. Karimov E.M., Teshaeve E.A., Erkali uulu U. Otsenka ustoichivosti nagornykh sklonov [Stability assessment of upland slopes]. Vestnik KRSU. 2018. V. 18. No. 12 (93). Pp. 93–95. (rus)

11. *Afinogenov O.P., Afinogenov S.V., Efimenko A.O.* Afinogenov Sovershenstvovanie metodov proektirovaniya avtomobil'nykh dorog na osnove differentsiatsii raionirovaniya. [Improving design road methods based on zoning differentiation]. Kemerovo: Ofset, 2015. 364 p. (rus)
12. *Kydyralieva G.A.* Otsenka vliyaniye vodno-fizicheskikh svoistv grunta na ego soprotivlyaemost' sdvigu [Influence of water and physical properties of soil on its shear resistance]. *Vestnik KGUSTA*. 2011. No.3. Pp. 29–33. (rus)
13. *Fedyuk R.S., Kozlov P.G., Mochalov A.V., Timokhin A.M.* Neobkhodimost' aktualizatsii dorozhno-klimaticheskogo raionirovaniya yuga Dal'nego Vostoka [Improvement of road-climatic zoning at the south of the Far East]. *Vestnik SibADI*. 2015. No. 4 (44). Pp. 90–100. (rus)
14. *Efimenko S.V., Badina M.V.* Uchet osobennostei prirodno-klimaticheskikh uslovii pri dorozhno-klimaticheskoy raionirovanii Zapadnoi Sibiri [Road-building climatic zoning in West Siberia]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 2. Pp. 204–213. (rus)
15. *Birulya A.K., Birulya V.I., Nosich I.A.* The stability of the soil of the roadway in the steppe regions. Moscow: Dorizdat, 1951. 176 p. (rus)
16. *Kuzminov M.P.* Mekhanika lessovykh gruntov Srednei Azii [Loess soil mechanics in Central Asia]. Tashkent: Fan, 1976. 143 p. (rus)

Сведения об авторе

Каримов Эркинбек Машанович, канд. техн. наук, доцент, Ошский технологический университет им. М.М. Адышева, 723503, Кыргызстан, г. Ош, ул. Исанова, 81, erkin.karimov.71@mail.ru

Author Details

Erkinbek M. Karimov, PhD, A/Professor, Osh Technological University, 81, Isanov Str., 723503, Osh, Kyrgyz Republic, erkin.karimov.71@mail.ru