

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. кафедрой строительной механики ТГАСУ; lls@tsuab.ru; г. Томск
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, главный ученый секретарь РААСН; pavel.akinov@gmail.com; г. Москва
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО; amb@stadyo.ru; г. Москва
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России; niitag@yandex.ru; г. Москва
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, ректор ТГАСУ; rector@tsuab.ru; г. Томск
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ; vvgg-tomsk@mail.ru; г. Томск
Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой технологии строительного производства ТГАСУ; tsp_tgasu@mail.ru; г. Томск
Деттярев В.В., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); ngasu_gts@mail.ru; г. Новосибирск
Дзюбо В.В., докт. техн. наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения ТГАСУ; dzv1956@mail.ru; г. Томск
Ефименко В.Н., докт. техн. наук, 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
Инжуртов И.С., докт. техн. наук, профессор, директор инженерно-строительного института СФУ; iinzhutov@sfu-kras.ru; г. Красноярск
Кнаиа 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
Кумпьяк 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; lezhavaiia@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 теплогоснабжения ТГАСУ; nac@tsuab.ru; г. Томск
Чернышов Е.М., докт. техн. наук, председатель президиума Центрального отделения РААСН, академик РААСН; chem@vgasu.vrn.ru; г. Воронеж
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН; niisf@niisf.ru; г. Москва
Яненко А.П., докт. техн. наук, профессор кафедры гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); ngasu_gts@mail.ru; г. Новосибирск

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» (подписной индекс 20424) включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по строительству и архитектуре, утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 17.06.2011 г.

Электронные версии журнала «Вестник ТГАСУ» представлены на сайтах «Научная электронная библиотека»: www.elibrary.ru; «Российская книжная палата»: <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; «Российская государственная библиотека»: <https://www.rsl.ru/>; «Томская областная универсальная научная библиотека имени А.С. Пушкина»: <https://www.lib.tomsk.ru>; «EBSCO»: <https://www.ebsco.com>; «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru>; «IPRbooks»: www.iprbookshop.ru, а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tsuab.ru>

Научное издание

ВЕСТНИК ТГАСУ № 4 – 2022

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)

ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

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

Журнал перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-81849 от 24 сентября 2021 г.

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

Редакторы Т.С. Володина, Г.Г. Семухина. Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш. Технический редактор Н.В. Удлер.
Подписано в печать 23.08.2022. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс. Дата выхода: 29.08.2022.
Уч.-изд. л. 14,59. Усл. печ. л. 17,33. Тираж 200 экз. Цена: свободная.
Зак. № 71.

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

16+

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2022

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL
OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 24

№ 4 2022
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

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

EDITORIAL STAFF

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

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

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

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

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

Scientific Edition

VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 4 – 2022
Print ISSN 1607-1859 Online ISSN 2310-0044

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

Founder: Tomsk State University of Architecture and Building

Editors T.S. Volodina, G.G. Semukhina. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 23.08.2022. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 29.08.2022.
Published sheets: 14,59. Conventional printed sheets: 17,33. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 71.

Editorial address: 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003
Phone: +7 (3822) 653-761; E-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
TSUAB Printing House, 15, Partizanskaya Str., Tomsk, 634003



© Tomsk State University
of Architecture and Building, 2022

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Шутка А.В., Гурьева Е.И. Современные тенденции формирования арт-объектов в городской среде (на примере жилого комплекса «Виадук» в г. Воронеже) (ВГТУ, г. Воронеж)	9
Киншт А.В., Малова Е.Д. Анализ градостроительной модели «Умный город» (НГУАДИ, г. Новосибирск)	20
Гурьева Е.И., Баранова Я.А. Обоснование инсоляционного режима и взаимовыгодного расположения функциональных зон города Ефремова Тульской области (ВГТУ, г. Воронеж)	30
Камынина А.С., Резницкая Л.М. Факторы, влияющие на проектную концепцию архитектурной школы в Тронхейме (ААИ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону)	41
Бегей Е.Д., Смолина О.О. Особенности и перспективы проведения конфигурационного анализа на территории застройки г. Новосибирска с использованием программного обеспечения Depthmap (НГАСУ, г. Новосибирск)	57

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Овсянников С.Н., Околичный В.Н., Овсянников А.Н., Лелюга О.В., Самохвалов А.С. Многослойное пленочное покрытие с высоким уровнем тепловой защиты (ТГАСУ, г. Томск)	72
Овсянников С.Н., Околичный В.Н. Результаты механических испытаний пленки из этилен-тетрафторэтилена (ТГАСУ, г. Томск)	89
Чайкин Е.А. Изучение напряженно-деформированного состояния узла структурной конструкции на клеенных стальных пластинах (СФУ, г. Красноярск)	99
Опбул Э.К., Калдар-оол А-Х.Б., Ле Куанг Хюи. Деформационная модель прочности изгибаемого элемента в среде Matlab (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург, ТувГУ, г. Кызыл)	110

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Гафаров Р.Е., Волокитин О.Г. Оптимизация процесса синтеза муллитовой керамики в среде термической плазмы (ТГАСУ, г. Томск)	130
Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Влияние структуры порглицементного клинкера на его гидравлическую активность (ВолгГТУ, АО «Себряковцемент», г. Михайловка)	139

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА,
ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Белоус А.Н., Оверченко М.В. Сравнительный анализ методик определения теплопоступлений от учащихся в зданиях образовательных организаций (ДонНАСА, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка).....	153
--	-----

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ,
СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Воробьева Е.В. Исследование коллоидных свойств нефтезагрязненных сточных вод и разработка способов их очистки (МПУ, г. Рязань).....	165
--	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания на свайном фундаменте для обеспечения необходимой пространственной жесткости (ТГАСУ, г. Томск).....	177
--	-----

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

Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Регулирование динамических характеристик несущих балок пролетных строений автодорожных мостов (ООО «ДИАМОС», г. Томск).....	188
---	-----

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Shutka A.V., Gur'eva E.I. Current trends in the formation of art objects in urban environment ("Viaduk" community in Voronezh) (Voronezh)	9
Kinsht A.V., Malova E.D. Analysis of the urban planning model "Smart City" (Novosibirsk).....	20
Gur'eva E.I., Baranova Ya.A. Insolution and improved location of functional zones of effremov-city in Tula region (Voronezh)	30
Kamynina A.S., Reznitskaya L.M. Factors influencing the design concept of Trondheim School of Architecture (Rostov-on-Don).....	41
Begey E.D., Smolina O.O. Configurational analysis of Novosibirsk's development area using Depth Map software (Novosibirsk)	57

BUILDING AND CONSTRUCTION

Ovsyannikov S.N., Okolichnyi V.N., Ovsyannikov A.N., Lelyuga O.V., Samokhvalov A.S. Multilayered coatings with high thermal protection (Tomsk).....	72
Ovsyannikov S.N., Okolichnyi V.N. Mechanical strength testing of ethylene-tetrafluoroethylene film (Tomsk).....	89
Chaikin E.A. Stress-strain state of glued wood-to-steel plate joint (Krasnoyarsk).....	99
Opbul E.K., Kaldar-Ool A-Kh.B., Le Kuang Khyui. Deformation modeling of bending element strength in Matlab (Saint-Petersburg, Kyzyl).....	110

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Gafarov R.E., Volokitin O.G. Optimized synthesis of mullite ceramics in thermal plasma (Tomsk)	130
Krutilin A.A., Krapchetova T.V., Inkova N.A., Pakhomova O.K. Structure influence of portland cement clinker on its hydraulic activity (Mikhailovka).....	139

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

Belous A.N., Overchenko M.V. Comparative analysis of identification techniques for heat gain from students in education institutions (Makeevka, Donetsk People's Republic)	153
---	-----

WATER SUPPLY, SEWERAGE,
BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Vorob'eva E.V. Colloidal properties of oil-contaminated sewage and its treatment (Ryazan)165

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A. Stress-strain state modeling of brick
building on pile foundation to provide spatial rigidity (Tomsk)177

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

Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V. Dynamic property control of bridge girders (Tomsk)188

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 711.581.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-9-19

А.В. ШУТКА, Е.И. ГУРЬЕВА,

Воронежский государственный технический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ АРТ-ОБЪЕКТОВ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ (НА ПРИМЕРЕ ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА «ВИАДУК» В Г. ВОРОНЕЖЕ)

Аннотация. В статье рассмотрены основные тенденции формирования арт-объектов в городской среде. Особое внимание уделено необходимости развития и разрешения проблемы эстетизации городской среды.

Объектом исследования являются арт-объекты в градостроительном контексте.

Проанализированы концепции создания арт-объектов и их включение в городское пространство. Предложены варианты арт-объектов в соответствии с созданием комфортной городской среды.

Обосновывается идея о том, что арт-объекты в городской среде являются элементом идентификации городского пространства.

Ключевые слова: общественное пространство, комфортная городская среда, арт-объект, ландшафт, композиция, средовой объект, градостроительство

Для цитирования: Шутка А.В., Гурьева Е.И. Современные тенденции формирования арт-объектов в городской среде (на примере жилого комплекса «Виадук» в г. Воронеже) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 9–19.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-9-19

A.V. SHUTKA, E.I. GUREVA,

Voronezh State Technical University

CURRENT TRENDS IN THE FORMATION OF ART OBJECTS IN URBAN ENVIRONMENT ("VIADUK" COMMUNITY IN VORONEZH)

Abstract. The article discusses the main trends in the formation of art objects in the urban environment. Special attention is paid to the development of aestheticizing the urban environment. Art objects are studied in the urban context. The article analyzes the concepts of creating

art objects in the urban space. Variants of art objects are proposed in accordance with the creation of a comfortable urban environment. The article substantiates the idea about art objects in the urban environment as elements of the urban space identification.

Keywords: public space, comfortable urban environment, art object, landscape, composition, the environment object, urban planning

For citation: Shutka A.V., Gur'eva E.I. Sovremennye tendentsii formirovaniya art-ob"ektov v gorodskoi srede (na primere zhilogo kompleksa "Viaduk" v g. Voronezhe) [Current trends in the formation of art objects in urban environment ("Viaduk" community in Voronezh)]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 9–19.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-9-19

Введение

Актуальность исследования объясняется потребностями формирования городской среды с учетом и использованием современных тенденций архитектурно-художественного оформления. Обратимся к расшифровке определения самого термина «арт-объект». Слово «арт-объект» состоит из двух составляющих: англ. art «искусство» + объект и лат. obiectum «предмет». Арт-объект (Art object или Objet d'art) – это предмет, вещь или иной объект, наделяемый каким-либо художественным смыслом [6].

Арт-объекты в современном городском пространстве весьма разнообразны, но имеют некоторые общие особенности, отражающиеся в концепции образного решения. Возможно классифицировать арт-объекты по следующим критериям: цель создания, расположение, функция, характеристики, форма, реализация, конкретное воплощение, актуальные стратегии (табл. 1).

Таблица 1

Классификация арт-объектов в городской среде

Цель создания	Проектирование эмоций, создание визуальной стратегии
Расположение	В городской среде (локальной, линейной) В структуре рекреационного пространства
Функция	Дарить настроение Впечатлять воображение Шокировать, эпатировать Привлекать внимание Нести определенную смысловую нагрузку Вызывать яркий эмоциональный отклик Рекламировать Свободный от функции и утилитарности
Характеристики	Уникальный Неповторимый Оригинальный Индивидуально разработанный Несущий определенную философию Неоднозначный Вызывающий эмоции

Окончание табл. 1

Цель создания	Проектирование эмоций, создание визуальной стратегии
Характеристики	Экспериментальный Авангардный Обладающий художественной ценностью, свободной от функциональности и утилитарности Объект изобразительного искусства
Форма	Конкретная геометрическая Абстрактная
Реализация	Живопись Витраж Декоративная керамика Художественная роспись Декоративные барельефы Различная скульптура
Материалы	Стандартные Необычные Искусственные материалы и новые технологии
Конкретное воплощение, актуальные стратегии	Арт-дизайн (англ. art-design – «искусство-дизайн») – течение постиндустриального дизайна, представители которого стремились соединить принципы дизайн-проектирования и традиционного художественного творчества (живописи, скульптуры, графики, декоративно-прикладного искусства) Ассамбляж (фр. assemblage) – техника визуального искусства, родственная коллажу, но использующая объёмные детали или целые предметы, скомпонованные на плоскости как картина. Допускает живописные дополнения красками, а также металлом, деревом, тканью и другими структурами Реклама Сюрреальность Концептуальность Игра контекстов Эксперименты визуальных иллюзий Метафора

Арт-объекты являются ценностными уникальными элементами городской среды, служат идентификации пространства и приносят современные черты искусства в информационный контекст. Арт-объект отражает современные тенденции стремления к уникальности, формирования нового стиля, направлений развития и совершенствования концепта искусства в городском пространстве.

Исследуя новый квартал г. Воронежа, мы исходим из основных концептуальных положений теории градостроительства, затрагивающих интересы различных групп населения и формирующих для всех этих групп общую городскую среду обитания.

Исследование городской среды дворовых пространств представляет большое научное и практическое значение для решения проблем качества архитектуры и городского планирования при создании «новостроя» в городе

с акцентом на красоту, эстетику и комфортность городской среды [1]. Оно необходимо при решении таких задач, как создание «чувства места», т. е. размещение мест общественного пользования в пределах каждой основной социально-демографической группы населения. Особое значение приобретает вопрос о необходимости создания и использования человеческого масштаба в архитектуре, поддерживающего гуманистический дух [4].

Градостроительный анализ

Задача включения арт-объектов в городское пространство рассматривается на конкретном примере: в структуре жилого комплекса «Виадук», расположенного в Коминтерновском районе г. Воронежа на проспекте Труда (рис. 1). Участки под размещение арт-объектов выделены небольшие, но значимые. Практически это художественный эксперимент по преобразованию городского пространства, возможность совмещения художественного формообразования и утилитарности функции в одном объекте. Исходные положения для конструирования арт-объектов сгруппированы в виде моделей с применением экологически чистых инновационных технологий, уважением к окружающей среде и осознанием ценности природных геосистем.



Рис. 1. Градостроительный анализ участка

Концепция в данном контексте рассматривается в двух выражениях: разработка самого арт-объекта и включение его в городское пространство. Научная новизна настоящего исследования заключается в том, что арт-объект рассматривается одновременно как объект искусства, как градостроительный элемент, формирующий городское пространство, и как образ идентификации конкретного места.

Концепция построения арт-объекта в конкретной градостроительной ситуации базировалась на размышлениях о смысле и значении слова – названия комплекса, а также философии смысла жизни и личностного самоопределения. Концептуальное видение разных состояний и этапов человеческой жизни, радости материнства и детства, любви, познания мира нашло свое выражение в образах арт-объектов. Создать комфортную благоустроенную и неповторимую среду во дворе современного жилого комплекса помогут объекты современного уличного искусства.

Концептуальное проектирование основано на внесении тематического смысла и содержания в формирование декоративно-художественного оформления дворовой территории жилого комплекса. Концепция поможет в создании неповторимого и уникального образа, эстетически комфортной среды в противовес безликой, серой массе городских пространств (рис. 2).

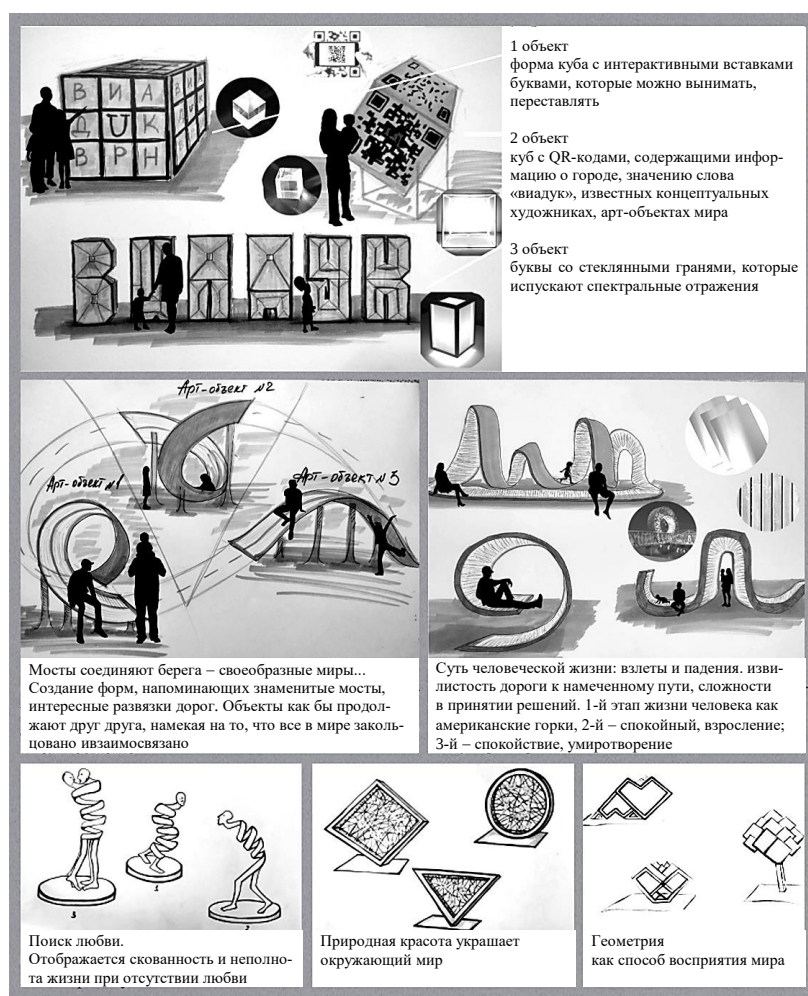


Рис. 2. Концепция арт-объектов для жилого комплекса «Виадук». Выполнили студентки 3-го курса А. Бредихина, Т. Костюкова. Руководители: А.В. Шутка, Е.И. Гурьева, А.Н. Зубцов, Г.М. Величко

Традиционные выразительные средства и современные технологии дают возможность проектирования новых образов и актуальных насыщенных изображений, служащих художественному оснащению городской среды.

Концепция выполнена графически. Эскизы в ручной графике отражают полет мысли, воображение, пространственные представления об арт-объекте, концепт его создания и вписание в градостроительную ситуацию (рис. 3).

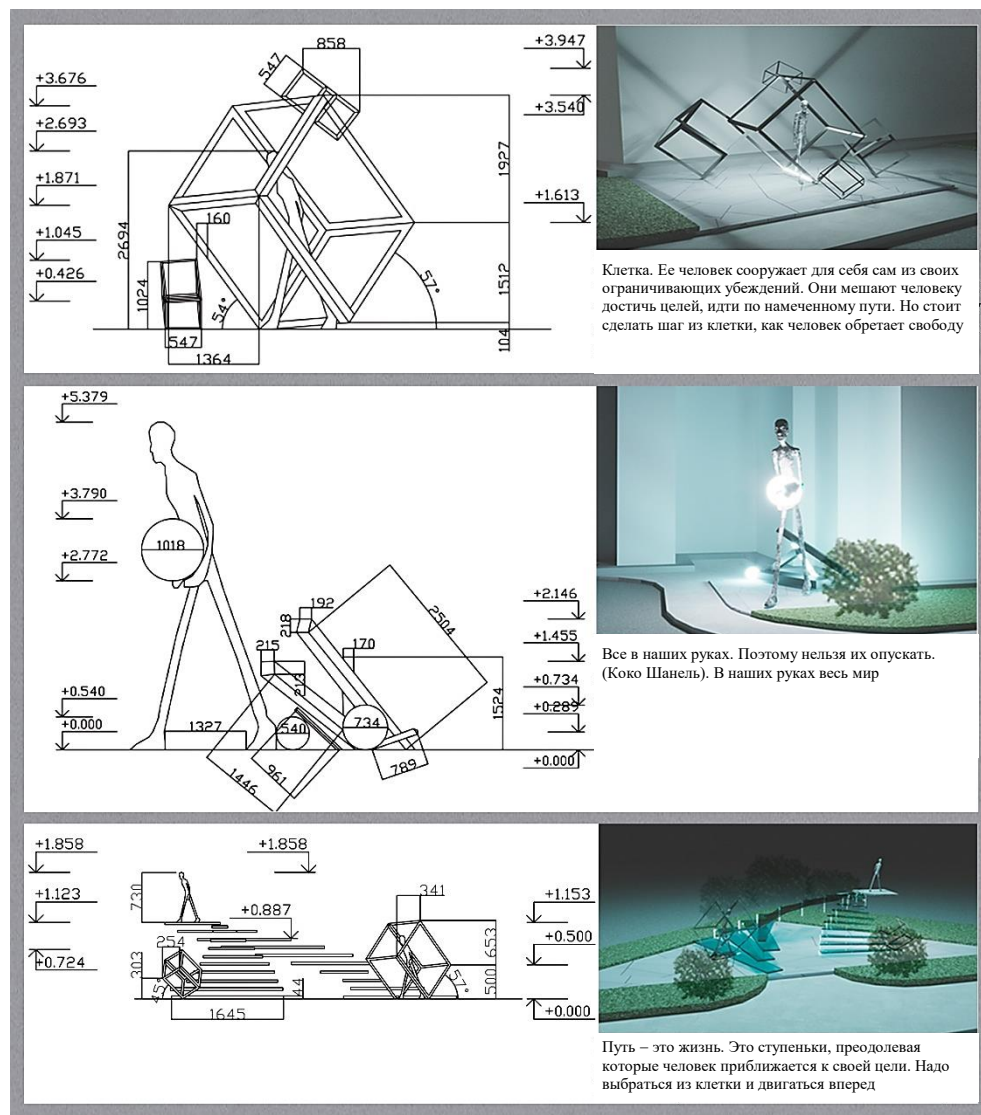


Рис. 3. Концепция арт-объектов для жилого комплекса «Виадук». Выполнила студентка 3-го курса В. Сенюкова. Руководители: А.В. Шутка, Е.И. Гурьева, А.Н. Зубцов, Г.М. Величко

При формировании концепции проекта эскизы часто выполняются в смешанных техниках: рисунок карандашом, акварельная отмычка, графика

с использованием маркеров. Для выражения идей также может быть использовано рабочее макетирование и компьютерное моделирование. Процесс эскизирования завершается выбором основного варианта проектного решения (рис. 4).

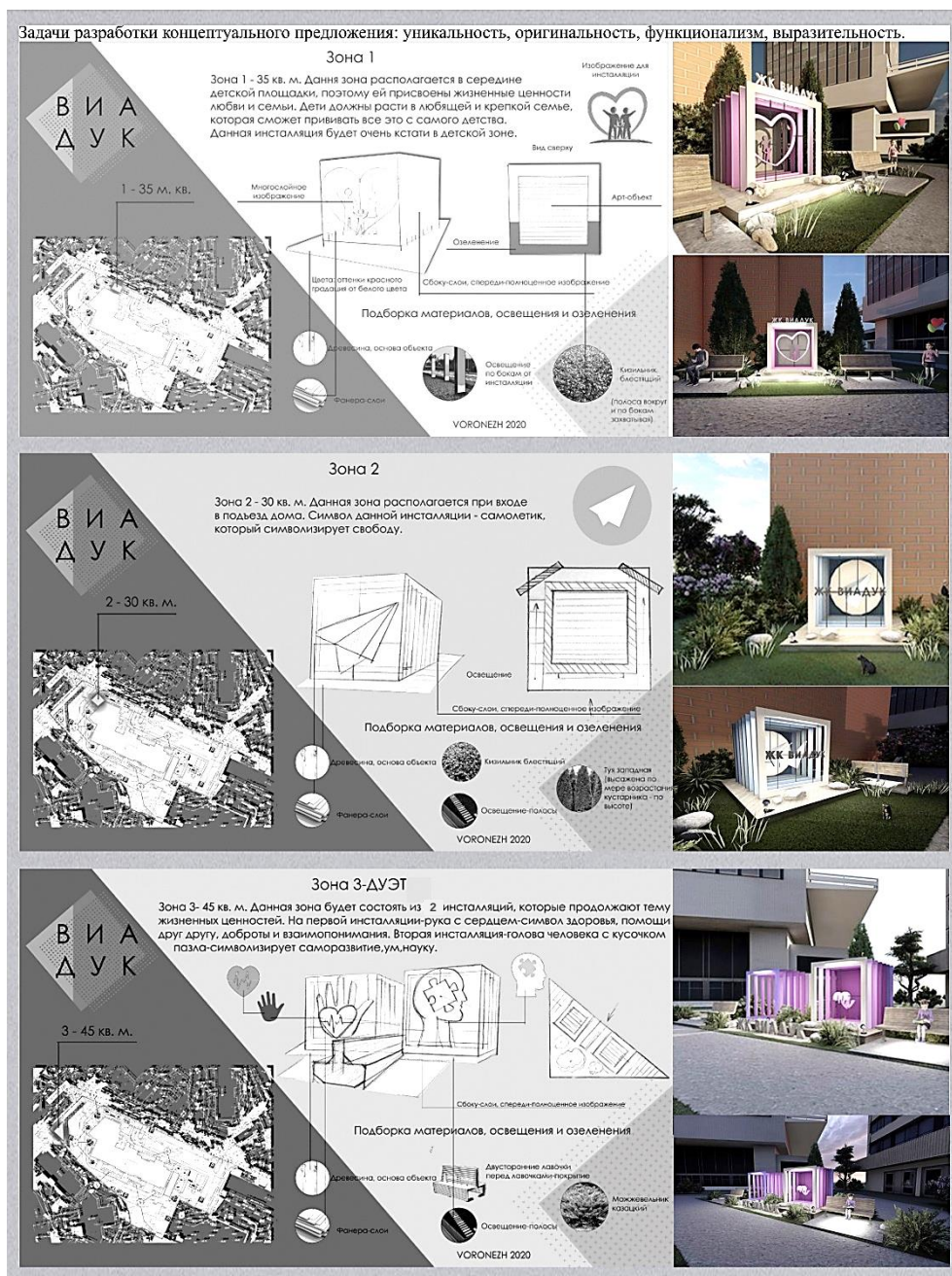


Рис. 4. Концепция арт-объектов для жилого комплекса «Виадук». Выполнила студентка 3-го курса А. Прокуратова. Руководители: А.В. Шутка, Е.И. Гурьева

Современные тенденции включения арт-объектов в городское пространство

Арт-объект в городской среде может быть: статичным или динамичным, инновационным, интерактивным, трансформируемым, мобильным, функциональным, утилитарным или художественной инсталляцией. Для реализации используются различные материалы и цветофактурные решения. Художественная значимость объекта может подчеркиваться освещением.

Современная социокультурная действительность носит глобальный мировой характер. Тенденции художественного оформления городского пространства также глобальны. Арт-объекты в городском пространстве могут быть акцентами или доминантами, органично вписываться или работать на контрасте, могут носить философский подтекст, являться выражением определенной насущной социальной проблемы, помогают переосмыслить окружающее пространство. Примеры и классификация арт-объектов приведены на рис. 5.



Рис. 5. Примеры арт-объектов в городской среде, их классификация

Архитектурно-ландшафтная организация территорий, где располагаются арт-объекты

Архитектурно-ландшафтная организация территорий представляет собой целостный территориально спланированный участок культурного ландшафта с принципами проектирования городской среды, элементы которого взаимосвязаны и обусловлены единым гармоничным сочетанием. Элементами ландшафтной архитектуры в данном случае выступают водные объекты, рельеф, растительность, т. е. взаимосвязь природных и архитектурных форм.

Адаптация внутреннего пространства дворовой территории с арт-объектом в целях ландшафтной архитектуры представляет собой идею – концепцию, реализованную в функциях объекта и планировочных компонентах, которые соответствуют данным функциям согласно принимаемым решениям [5]. Градостроительные аспекты проектирования зеленых насаждений вокруг арт-объекта производятся по схеме: функциональные зоны – структурно-планировочные элементы – планировочные элементы [2].

Системно-ландшафтный и экологический метод при проектировании арт-объекта и его вписывания в городскую среду предполагает выполнение следующих принципов:

1) гигиенические и декоративные качества растений при подборе ассортимента в композицию с арт-объектом определяются развитием первоначальной идеи;

2) градостроительный анализ территории предоставляет основу для разработки мероприятий по улучшению микроклимата и общему композиционному решению [3, 6, 7];

3) подобранный ассортимент растений должен служить фоном для арт-объекта, усиливая пространственные и эстетические качества среды вокруг него;

4) подборка устойчивого видового состава древесной, кустарниковой и цветочной растительности, преобразование рациональной структуры насаждений, устранение неблагоприятных воздействий на организм человека с использованием альтернативного озеленения (вертикальное, мобильное, фасадное) [3].

На основе проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что арт-объекты в городской среде должны рассматриваться как элементы архитектурно-художественного своеобразия городской среды и разрабатываться для конкретной территории с учетом градостроительных особенностей и городского функционального контекста.

2. Анализ показал, что арт-объекты в городской среде являются элементом идентификации городского пространства.

3. Выявлены следующие современные тенденции формирования арт-объектов в городской среде:

- концептуальное решение;
- вписывание в городской контекст с учетом месторасположения территории размещения арт-объектов в городской среде, значимости, стиля, материалов, этажности окружающей застройки;

– построение по законам красоты, создание яркого необычного образа, привлекающего внимание и вызывающего живой интерес у наблюдателей; формирующего идентификацию городского пространства;

– использование инновационных и интерактивных технологий.

4. Дана классификация арт-объектов, функции, характеристики, форма, реализация, материалы, конкретное воплощение, актуальные стратегии.

5. Возможности создания архитектурно-художественного образа городской среды многочисленны, безграничны и неисчерпаемы. Арт-объекты являются яркой и неповторимой частью архитектурно-художественной структуры городского пространства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шутка А.В., Гурьева Е.И. Градостроительное проектирование ландшафтов. Основы проектирования ландшафтов / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2020. 77 с.
2. Шутка А.В., Гурьева Е.И. Градостроительная оптимизация структуры рекреационных территорий на примере сквера на ул. Депутатская г. Воронежа // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 22. № 1. С. 31–43.
3. Шутка А.В., Гурьева Е.И. Архитектурно-пространственные особенности формирования городского сквера // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 1. С. 50–57.
4. Кухта М.С., Соколов А.П., Сокур К.С. Художественно-проектные решения и современные технологии арт-объектов средового дизайна // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 6. С. 177–181.
5. Бучельникова Н.П., Баклыская Л.Е. Арт-объект как элемент жилого интерьера и городской среды // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2014. № 1. С. 43–46.
6. Рублев В. Арт-словарь: терминология, виды, жанры, стили, направления изобразительного искусства : интернет-альманах ЯВАРДА.
7. Ануфриева А.В. Арт-объект. Актуальные стратегии // Вестник ИрГТУ. 2012. № 10. С. 340–343.

REFERENCES

1. Shutka A.V., Gureva E.I. Gradostroitel'noe proektirovaniye landshaftov. Osnovy proektirovaniya landshaftov [Urban landscape design. Basics of landscape design]. Voronezh: VSTU, 2020. 77 p. (rus)
2. 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 (rus)
3. Shutka A.V., Gureva E.I. Arkhitekturno-prostranstvennyye osobennosti formirovaniya gorodskogo skvera [Architecture and spatial formation of the city park]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 1. Pp. 50–57. (rus)
4. Kukhta M.S., Sokolov A.P., Sokur K.S. Khudozhestvenno-proektnye resheniya i sovremennyye tekhnologii art-ob"ektov sredovogo dizaina [Art and design solutions and modern technologies in art objects of environmental design]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta 2011. V. 319. No. 6. Pp. 177–181. (rus)
5. Buchel'nikova N.P., Baklyskaya L.E. Art-ob"ekt kak element zhilogo inter'era i gorodskoi sredy [Art object as an element of the residential interior and urban environment]. Dal'nii Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. 2014. No. 1. Pp. 43–46. (rus)

6. Rublev V. Art-slovar': terminologiya, vidy, zhanry, stili, napravleniya izobrazitel'nogo iskusstva [Art dictionary: Terminology, types, genres, styles, directions of fine art]. Internet-al'manakh YAVARDA. (rus)
7. Anufrieva A.V. Art-ob"ekt. Aktual'nye strategii [Art object. Current policies]. *Vestnik IrGTU*. 2012. No. 10. Pp. 340–343 (rus)

Сведения об авторах

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

Гурьева Елена Ивановна, канд. с.-х. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет. 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия 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. Gureva, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia gurjeva_el@mail.ru

УДК 05.23.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-20-29

*А.В. КИНШТ, Е.Д. МАЛОВА,
Новосибирский государственный университет
архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова*

АНАЛИЗ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ «УМНЫЙ ГОРОД»

Аннотация. Одним из способов повышения эффективности управления и развития территории в крупных и крупнейших городах является градостроительная модель «Умный город».

Целью работы является проведение анализа данной модели, включая определение причин ее возникновения; анализ эволюции понятия и базовых принципов; фиксация перехода модели к проекту «Умный город» в отечественной практике; выявление особенностей структуры отечественного проекта. Основными методами исследования стали сбор и анализ нормативного, теоретического и практического материала по теме.

Результат работы включает следующие положения. Градостроительная модель «Умный город» в отечественной практике и в рамках российского правового регулирования определяется ведомственным проектом Минстроя РФ «Умный город». Рассматриваемые в проекте понятия цифровизации и умного города не отвечают в полной мере необходимости планирования развития крупного города. С одной стороны, проект переходит в сферу рекламы высокотехнологичных товаров и услуг, с другой стороны, развивается как новая градостроительная модель. Следовательно, проблема состоит в двойственности определения понятия «умный город» и степени включения технологий в градостроительную деятельность. Действующее понятие недостаточно для определения перспектив развития территорий. В результате было предложено следующее определение проекта. «Умный город» – это совокупность идей и подходов, которые позволяют сформировать стратегию градостроительного развития территорий на основе объективной характеристики взаимосвязанности всех параметров городской среды, включая прогнозирование динамики изменения данных параметров. В таком варианте проект способен учесть наибольшее количество параметров качества городской среды, оперируя объективным анализом экономических, социологических и иных данных. Строго техническое переоснащение городской инфраструктуры является одной из частей проекта.

Ключевые слова: умный город, цифровизация в градостроительной деятельности, оптимизация в градостроительной деятельности, новая градостроительная модель, проект цифровизации городского хозяйства

Для цитирования: Киншт А.В., Малова Е.Д. Анализ градостроительной модели «Умный город» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 20–29.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-20-29

*A.V. KINSHT, E.D. MALOVA,
Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts*

ANALYSIS OF THE URBAN PLANNING MODEL "SMART CITY"

Abstract. Purpose: The aim of the work is to analyze the "Smart City" model, including reasons of its development; the concept development; the transition of the "Smart City" model

to the Smart City Project in Russia; identify the Project content. *Methodology*: The urban planning model "Smart City" is one of the ways to improve the efficiency of territory management in large cities. Research is based on the collection and analysis of the appropriate normative, theoretical and practical documents. *Research findings*: In practice and within the framework of Russian legal regulation, this model is determined by the Smart City Project of the Ministry of Construction of the Russian Federation. The Project concepts of digitalization do not fully meet the need for the development of a large city. On the one hand, the project concerns the sphere of advertising high-tech goods and services, and on the other, it is a new urban development model. The problem lies in the duality of the definition of the smart city concept and urban planning technologies. *Practical implications*: The proposed definition of the Smart City Project is a set of ideas and approaches allowing to generate a strategy of urban development based on the parameters of the urban environment, including the prediction of changes in these parameters. In this case, the Project considers the largest number of quality parameters of the urban environment, using the economy analysis, sociological and other data. Strictly technical re-equipment of urban infrastructure is included in the Project.

Keywords: smart city, urban planning, optimization, urban model, digitalization project

For citation: Kinsht A.V., Malova E.D. Analiz gradostroitel'noi modeli "Umnyi gorod" [Analysis of the urban planning model "Smart City"]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 20–29.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-20-29

Рост численности городского населения является устойчивой тенденцией. В наиболее развитых странах доля городского населения особенно высока. В Англии она достигает 78,3 %, в Дании – 83,5 %, Бельгии – 95,2 % [1]. В России этот показатель составляет 74,8 % [2]. Опережающими темпами растут крупные и крупнейшие города, вместе с тем они сталкиваются с проблемой эффективного управления и развития территории [3]. Градостроительная модель «Умный город» рассматривается как один из способов решения данного вопроса.

Целью работы является проведение анализа градостроительной модели «Умный город». Объектом исследования выступает данная концепция, которая исследуется на предмет достаточности ее возможностей для решения актуальных градостроительных проблем. В рамках настоящей работы необходимо определить причины возникновения градостроительной концепции «Умный город»; рассмотреть эволюцию понятия и базовых принципов модели; проследить переход модели к проекту «Умный город» в отечественной практике; выявить особенности структуры отечественного проекта. Основными методами исследования являются сбор и анализ теоретического, нормативного и практического материала по теме.

Необходимость существенного переосмысления принципов городского развития в 1960–80-е гг. была вызвана научно-техническим развитием и глобализацией социальных процессов второй половины XX в. Одним из основных ресурсов городского управления стала информация. Вместе с тем научно-технический прогресс сопровождался «прогрессом» противоречий [4]. Следствием развития общества стало появление новых требований к городской среде и устаревание традиционных подходов в градостроительной практике.

Это потребовало ускорения процессов управления и реагирования, оптимизации работы и взаимодействия городских систем без потери качества этого взаимодействия.

Как способ оптимизации городского управления в зарубежной научной среде в 1980-х гг. возникла концепция Smart city [5]. Основой ее разработки стало создание искусственного интеллекта [6].

Концепция Smart city прошла три эволюционных этапа. Раннее представление об умных городах – Smart city 1.0 – выявило проблему в эффективности управления. На этом этапе было предложено более широкое применение технической обработки градостроительных данных, но системного подхода к управлению сформировано не было [7]. Второй эволюционный этап – Smart city 2.0 – развил первоначальную идею и определил исключительное положение технических инноваций в качестве основы городского управления [8]. Однако идея строго технического переоснащения не учитывает мощные социокультурные изменения, связанные с развитием мегаполисов [9]. На современном этапе концепция Smart city 3.0 рассматривает технические инновации как один из инструментов решения городских проблем, наравне с обеспечением социальной вовлеченности и учетом городского контекста [10].

Концепция Smart city впервые появилась в зарубежной научной среде как ответ на глобальную урбанизацию и активное развитие технологий. Сегодня эта идея, с одной стороны, перешла в сферу рекламы высокотехнологичных товаров и услуг, с другой стороны, развивается как новая градостроительная модель.

В отечественной научной среде интерес к умному городу появляется и возрастает в 2010-х гг. Он учитывает зарубежный опыт и определяется оценкой перспектив создания умных городов в России [11–13]. Теоретические работы постепенно становятся основой отдельных проектов. Они подразумевают как преобразование существующих городов (Москва, Санкт-Петербург, Казань и др.), так и строительство новых инновационных площадок (научные города Сколково, Иннополис и др.).

Рост численности населения крупнейших городов приводит к увеличению транспортной, социально-экономической и иных инфраструктур, включая информационные базы, которые ежедневно обрабатываются в процессе управления. Усложнение городской системы приводит к необходимости совершенствования системы управления в соответствии с новыми требованиями. В этих условиях подход «Умного города» позиционируется как наиболее перспективная модель обработки градостроительных данных.

В России в 2019 г. градостроительная модель «Умный город» закрепились в качестве ведомственного проекта по цифровизации городского хозяйства Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Проект был поддержан национальной программой «Цифровая экономика» и рядом других программ. Таким образом, модель «Умный город» вошла в состав стратегических направлений развития городов России.

Рассмотрим ключевые документы, входящие в состав проекта цифровизации городского хозяйства «Умный город». К ним относятся: Паспорт ведомственного проекта (Приказ Минстроя России № 695/пр от 31.10.2018 г.),

стандарт «Умный город»: базовые и дополнительные требования к умным городам и Методика оценки хода и эффективности цифровой трансформации городского хозяйства (Приказ Минстроя России № 924/пр от 31.12.2019 г.).

В основу построения отечественного проекта положено понятие цифровизации. В наиболее широком понимании под цифровизацией подразумевается процесс переноса в цифровую среду функций и деятельности, ранее выполнявшихся людьми и организациями [14]. Такое формальное понимание отражает лишь технологию записи информации. При этом качественного изменения функции не происходит. В рамках данного определения цифровизация не влияет на повышение эффективности и объективности работы.

Отечественный проект уточняет определение. Документ, на который ссылается проект, иначе трактует понятие цифровизации. Согласно Методике оценки хода и эффективности цифровой трансформации, под цифровизацией понимается замена аналоговых способов сбора и обработки данных цифровыми технологическими системами, которые генерируют, обмениваются, передают и обрабатывают цифровой сигнал о своем статусе, состоянии городских объектов и событиях. Определение обращает внимание, прежде всего, на массовый автоматический сбор информации о состоянии окружающей среды с первичной обработкой данных.

В соответствии с этим в проекте указываются мероприятия в первую очередь технического оснащения городской среды: развитие городских Wi-Fi-сетей; внедрение системы автоматической фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения; устройство автоматизированной системы сбора и анализа информации о состоянии окружающей среды; оснащение зданий датчиками и иными приборами учета потребления коммунальных услуг с возможностью прогнозирования аварийных ситуаций.

Однако разработка градостроительной модели требует уточнения целей и задач. Техническое переоснащение может являться дополнительной задачей проекта, но не основной целью качественного преобразования системы городского управления. Современное понимание качества городской среды гораздо шире. Оно включает развитие и доступность социокультурной инфраструктуры, рациональное использование территорий, общественную и экологическую безопасность, комфорт, вариативность, доступность различных объектов городской среды. Для решения данных вопросов требуется одновременное привлечение информации из различных сфер жизни города.

Сегодня этапы алгоритмов обработки градостроительной информации существуют и выполняются отдельными специалистами, которые не всегда могут взаимодействовать. Под цифровой трансформацией необходимо понимать объединение этих работ воедино.

Так, цифровизация является в первую очередь инструментом повышения качества и скорости работы с информацией. Это отвечает современному направлению развития общества, резкое увеличение объемов информации не может обрабатываться старыми методами. Цифровые технологии включают алгоритмы, которые обеспечивают постепенную автоматизацию сбора, распределения, обновления и анализа базы данных городских систем [15]. С одной стороны, этот алгоритм помогает провести быструю и объективную

оценку состояния физической и виртуальной среды крупных городов, снижая необходимость участия человека в процессе сбора и анализа информации. С другой стороны, такой подход обеспечивает виртуальное взаимодействие жителей с городскими инфраструктурами на цифровых платформах.

Таким образом, под цифровизацией предлагается понимать систематизированное накопление разнородных данных об окружающей среде на цифровых носителях, которое дает возможность объективной обработки получаемой информации современными методами анализа. Результатом цифровизации является оперативное и качественное управление и планирование изменений городской среды.

Согласно стандарту «Умный город», вовлечение граждан в сотрудничество по решению вопросов городского развития может происходить на нескольких уровнях, которые включают информирование, консультирование, соучастие и партнерство. К наиболее эффективным дистанционным форматам информирования относят размещение информации на сайте администрации и в социальных сетях; консультирования – проведение голосований, опросов и публичных слушаний в режиме онлайн; соучастия – проведение конкурсов среди жителей в дистанционном формате; партнерства – обеспечение функции общественного надзора за ходом реализации на официальном сайте проекта [16]. Таким образом, использование цифровых технологий способно определить потребности социума, невзирая на высокую численность населения.

Отечественный проект определяется рядом мероприятий, которые приведены в стандарте базовых и дополнительных требований к умным городам. Мероприятия подразделяются на различные сферы городского хозяйства и описывают процессы их технического переоснащения. Документ включает перечень различных мероприятий: от поэтапного внедрения государственных информационных систем до установки автоматизированных систем учета параметров обеспечения коммунальных услуг. Перечень подразделяется на направления: «городское управление», «умное ЖКХ», «инновация для городской среды», «умный городской транспорт», «системы общественной и экологической безопасности», «инфраструктура сетей связи» и другие блоки. Такой подход направлен на решение отдельных городских задач. Решение этих вопросов должно быть взаимосвязано, результаты отдельных решений не всегда оптимальны.

Практики успешной интеграции технических продуктов в сферу городского управления приведены на официальном сайте отечественного проекта. С одной стороны, это позволяет сделать вывод о тесном взаимодействии бизнеса технических инноваций с системой городского управления. С другой стороны, «Умный город», как и в зарубежном опыте, становится частью рекламной кампании на рынке технологий. В рамках проекта Минстрой России публикует ежегодные отчеты лучших муниципальных практик и обновляет рейтинг умных городов России, что стимулирует расширение географии проекта и увеличение количества вариантов использования технологий.

Однако отдельные технологические решения не способны сформировать единую градостроительную модель. Глобальная урбанизация приводит к многочисленным проблемам в управлении крупнейшими городами. Это свя-

зано со спецификой адаптации исторически сформировавшихся пространств, потребностью в серьезных функциональных трансформациях и сложностью в развитии устоявшихся систем. Требуется учет особенностей природно-климатических, социокультурных, экономических, экологических и иных качеств территории для обеспечения ее качественной трансформации на основе выявленных уникальных ресурсов, возможностей и рисков. Единообразный подход с применением технологий становится явно недостаточным, во главу угла ставится стратегическое планирование. Оно определяется механизмом развития территорий, в котором учитываются процессы целеполагания, прогнозирования и планирования природно-климатических, социально-экономических и экологических изменений [17]. Стратегическое планирование учитывает широкий и разнообразный спектр параметров города, которые специфичны для каждого города. Обработка такого рода параметров требует своего алгоритма, который не предусматривается в проекте «Умный город».

Одним из базовых документов территориального планирования является генеральный план поселения. Согласно Градостроительному кодексу Российской Федерации, генплан устанавливает границы, функциональные зоны поселения и размещает планируемые объекты различного значения. Он характеризуется в первую очередь как оперативный директивный документ [18]. Это подразумевает общий и во многом односторонний характер градостроительных решений, предусмотренных для отдельной территории со строго установленными границами. Генеральный план решает принципиальную допустимость видов использования территории и их соотношений. Параметры генерального плана являются географически распределенной информацией, которая описывает в том числе различные функциональные зоны городской территории. Для качественной работы с такого рода материалом требуется привлечение специфичных пакетов программ из области геоинформационных систем (ГИС). Они дают возможность формализовать природно-географическую информацию и информацию об изменениях антропогенного характера: типология объектов и их связей. Это позволяет учитывать антропогенные изменения территории, определяющие степень реализации генерального плана. Однако категоричность генерального плана не всегда соотносится со скоростью изменения условий развития крупнейших городов.

Современные подходы в градостроительстве требуют учета сложившихся параметров территории в совокупности с динамикой экономических, социокультурных и иных изменений. Это отражается в формировании мастер-плана территории.

Мастер-план – это стратегия пространственного развития, содержащая выраженную градостроительную компоненту, в инициативном порядке разрабатываемая публичной властью при участии представителей различных групп населения, в том числе горожан, властей и представителей бизнеса [18]. Мастер-план выступает как соединение стратегических и более детальных территориальных разработок, содержащих развитое целеполагание и приоритетные направления в развитии территории, механизмы и инвестиционные ресурсы его реализации [18]. Он подразумевает вариантное планирование в условиях неопределенности, включает комплексный градостроительный анализ, не-

сколько принципиальных программ развития территории и ее положения в системе расселения.

Геоинформационные системы, созданные на основе генерального плана, соответствующие стратегии мастер-планирования, способны гораздо быстрее реагировать на городские изменения. Более того, на их основе возможно провести оптимизационные расчеты любых вариантов перспективных изменений.

Основным отличием мастер-плана от генерального плана поселений является гибкость подходов к исследованию территории, представлению моделей ее развития и оформлению результатов.

Таким образом, с точки зрения стратегического мастер-планирования «умных городов» подготовки генерального плана становится недостаточно. Необходимо всестороннее исследование территории, включая определение возможностей, рисков, формирование различных траекторий развития и апробацию предложений в цифровой среде. Градостроительная документация не должна фиксировать существующее положение или один вариант развития территорий. Она способна перейти на следующий уровень вариантного проектирования, исходя из анализа больших данных и апробации вариантов с помощью технологий. Реализация генерального плана позволит учесть основные возможности и ограничения территории в долгосрочной перспективе. Дополнение генерального плана мастер-планом позволит оценить динамику условий градостроительного развития.

ГИС на основе мастер-планирования не являются условными проявлениями цифровизации в градостроительной деятельности. Формализация данных является одной из задач, однако основным преимуществом становится появление эффективного инструмента анализа большого количества сопряженных данных, зависящих друг от друга. Способность насыщения схем территориального планирования «живой» информацией, обеспеченной функциональной зависимостью различных параметров, позволит выйти на новый уровень объективного и комплексного принятия решений.

Тогда под градостроительной моделью «Умный город» необходимо понимать в меньшей мере техническое переоснащение существующей городской инфраструктуры. «Умный город» – это совокупность идей и подходов, которые позволяют сформировать стратегию градостроительного развития территорий на основе объективных расчетов и характеристики взаимосвязанности всех параметров городской среды, включая прогнозирование динамики изменения данных параметров.

Выводы

Градостроительная модель «Умный город» в отечественной практике и в рамках российского правового регулирования определяется ведомственным проектом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации «Умный город».

Рассматриваемые в проекте понятия цифровизации и умного города не отвечают в полной мере необходимости планирования развития крупного города. Проект направлен на решение отдельных инфраструктурных вопросов и не реализует управление городом как единой системой.

В основе проекта лежит понятие цифровизации, которое не соответствует современному понятию информационных ресурсов. Цифровизация подразумевает не только накопление и возможность использования данных, включая обработку уже имеющимися способами, но и создание новых алгоритмов, которые позволяют решать задачи более высокого ранга. Кроме технического переоснащения следует учитывать взаимодействие местных властей с городскими сообществами, невзирая на численность населения.

С одной стороны, проект «Умный город» воспринимается как инструмент рекламы, игра слов и даже враждебная формулировка, которая противоречит обоснованности решений градостроительных программ, которые реализовались ранее. С другой стороны, проект является перспективной идеей, визуализацией процесса объединения технологий и традиционных подходов развитию территорий. Следовательно, проблема состоит в определении понятия «умный город» и степени включения технологий в градостроительную деятельность.

Системной задачей проекта «Умный город», реализуемой в том числе новейшими техническими средствами, должно стать обеспечение объективной оценки различных городских процессов и обеспечение связанности алгоритмов решения различных проблем города.

Градостроительную деятельность «умных городов» необходимо основывать на стратегическом подходе. Генеральный план, определяющий принципиальные возможности и ограничения использования территорий, необходимо дополнить разработкой мастер-плана, который позволит оценить и учесть динамику условий градостроительного развития. Тогда возможно не только отражение существующего и расчетного состояния территорий на основе имеющихся условий, но и моделирование вариантов ее развития в системе расселения на основе глубокого анализа больших данных.

Необходимые предпосылки для реализации проекта «Умный город» имеются, прежде всего, в крупных городах. К негативному фактору относится проблема эффективности управления в условиях роста численности населения. Позитивным фактором является централизация цифрового развития регионов в административных центрах.

Вместе с тем «умные города» России характеризуются обширной и неоднородной географией. Разнообразие дает возможность анализировать различные природно-климатические, социально-экономические, экологические и иные условия реализации проекта. Несмотря на большое количество участников федеральной программы, большинство городов реализуют локальные технические решения и не формируют целостную программу цифровой трансформации.

«Умный город» – это совокупность идей и подходов, которые позволяют сформировать стратегию градостроительного развития территорий на основе объективной характеристики взаимосвязанности всех параметров городской среды, включая прогнозирование динамики изменения данных параметров. Строго техническое переоснащение городской инфраструктуры в меньшей мере определяет суть «умного города». Проект способен учесть наибольшее количество параметров качества городской среды, оперируя объективным анализом экономических, социологических и иных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. World Bank Group. Urban population indicator. Washington, D.C. URL: https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?year_high_desc=true (дата обращения: 27.01.2022).
2. Витрина статистических данных. Доля городского населения в общей численности населения на 1 января // Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации. URL: <https://showdata.gks.ru/report/278932/> (дата обращения: 30.01.2022).
3. Wahba Tadros S.N., Wellenstein A., Das Maitreyi B., Palmarini N., Severine O., Singh G., Restrepo Cadavid P., Terraza Horacio C., Lakovits C., Baeumler A., Gapihan Treyllane A. Demographic Trends and Urbanization (English). Washington, D.C. : World Bank Group, 2021.
4. Константинова Ф.В., Марахова В.Г. Материалистическая диалектика. В 5 томах. Т. 4. Диалектика общественного развития / отв. ред. В.Г. Марахов. Москва : Мысль, 1984. 320 с.
5. Акимова О.Е., Волков С.К., Хрысева А.А. Концепция «Умный город»: эволюция, элементы и форма реализации // Теоретическая экономика. 2020. № 6 (66).
6. Вознюк П.А. История развития и современное состояние искусственного интеллекта // Глобус: технические науки. 2019. № 3 (27).
7. Appio F., Limab M., Paroutis S. Understanding Smart Cities: Innovation Ecosystems, Technological Advancements, and Societal Challenges // Technological Forecasting and Social Change. 2019. P. 1–14.
8. Колодий Н.А., Иванова В.С., Гончарова Н.А. Умный город: особенности концепции, специфика адаптации к российским реалиям // Социологический журнал. 2020. Т. 26. № 2. С. 102–123.
9. Захарова В.И. Социокультурное пространство мегаполиса // Теория и практика общественного развития. 2017. № 2.
10. Praharaj S., Han J., Hawken S. Urban innovation through policy integration: Critical Perspectives from 100 Smart Cities Mission in India // City, Culture and Society. 2018. P. 35–43.
11. Ганин О.Б., Ганин И.О. «Умный город»: перспективы и тенденции развития // ARS Administrandi. 2014. № 1.
12. Волков А.А., Седов А.В., Чельшиков П.Д. Концепция «Умный город». Москва : Изд-во МИСИ-МГСУ, 2015.
13. Запорожец О.Н., Лапина-Кратасюк Е.Г. Антропология цифрового города: к вопросу о выборе метода // Этнографическое обозрение. 2015. № 4. С. 41–54.
14. Хомякова С.С. Трансформация и закрепление термина «цифровизация» на законодательном уровне // Молодой ученый. 2019. № 41 (279). С. 9–12.
15. Ерохина О.В. «Умная Москва»: новая концепция развития столицы // Гуманитарные науки. Вестник Финансового университета. 2018. № 3 (33). С. 6–10.
16. Стандарт вовлечения граждан в решение вопросов развития городской среды // Центр городских компетенций Агентства стратегических инициатив совместно с Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Москва, 2020. С. 76.
17. Российская Федерация. Законы. О стратегическом планировании в Российской Федерации : Федеральный закон Российской Федерации от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ. Ст. 3.
18. Тузовский В.С. Становление понятия «мастер-план» в отечественной градостроительной теории и практике // Ноэма. 2019. № 3-5 (3). С. 27–29.

REFERENCES

1. World Bank Group. Urban population indicator. Washington, D.C. Available: https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?year_high_desc=true (accessed January 27, 2022).
2. Vitrina statisticheskikh dannyykh. Dolya gorodskogo naseleniya v obshchei chislennosti naseleniya na 1 yanvarya [Statistical data showcase. Share of urban population in the total population as, January 1]. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Rossiiskoi Federatsii. Available: <https://showdata.gks.ru/report/278932/> (accessed January 30, 2022). (rus)
3. Wahba Tadros S.N., Wellenstein A., Das Maitreyi B., Palmarini N., Severine O., Singh G., Restrepo Cadavid P., Terraza Horacio C., Lakovits C., Baeumler A., Gapihan Treyllane A. Demographic trends and urbanization. Washington D.C. World Bank Group, 2021.

4. *Konstantinova F.V., Marakhova V.G.* Materialisticheskaya dialektika [Materialistic dialectics], in 5 vol. Dialektika obshchestvennogo razvitiya, V.G. Marakhov, Ed. Moscow: Mysl', 1984. V. 4. 320 p. (rus)
5. *Akimova O.E., Volkov S.K., Khryseva A.A.* Kontseptsiya "Umnyi gorod": evolyutsiya, elementy i forma realizatsii [Smart City concept: Evolution, elements and implementation]. *Teoreticheskaya ekonomika*. 2020. No. 6 (66). (rus)
6. *Voznyuk P.A.* Istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyanie iskusstvennogo intellekta [The history of development and current state of artificial intelligence]. *Globus: tekhnicheskie nauki*. 2019. No. 3 (27). (rus)
7. *Appio F., Limab M., Paroutis S.* Understanding smart cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges. *Technological Forecasting and Social Change*. 2019. Pp. 1–14.
8. *Kolodii N.A., Ivanova V.S., Goncharova N.A.* Umnyi gorod: osobennosti kontseptsii, spetsifika adaptatsii k rossiiskim realiym [Smart city: The concept, specifics of adaptation to Russian realities]. *Sotsiologicheskii zhurnal*. 2020. V. 26. No. 2. Pp. 102–123. (rus)
9. *Zakharova V.I.* Sotsiokul'turnoe prostranstvo megapolisa [Sociocultural space of metropolis]. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya*. 2017. No. 2. (rus)
10. *Praharaj S., Han J., Hawken S.* Urban innovation through policy integration: Critical perspectives from 100 smart cities mission in India. *City, Culture and Society*. 2018. Pp. 35–43.
11. *Ganin O.B., Ganin I.O.* "Umnyi gorod": perspektivy i tendentsii razvitiya [Smart city: Prospects and development trends]. *ARS Administrandi*. 2014. No. 1. (rus)
12. *Volkov A.A., Sedov A.V., Chelyshkov P.D.* Kontseptsiya "Umnyi gorod" [The smart city concept]. Moscow: MISI-MGSU, 2015. (rus)
13. *Zaporozhets O.N., Lapina-Kratasyuk E.G.* Antropologiya tsifrovogo goroda: k voprosu o vybore metoda [Anthropology of digital city: Choosing a method]. *Etnograficheskoe obozrenie*. 2015. No. 4. Pp. 41–54. (rus)
14. *Khomyakova S.S.* Transformatsiya i zakreplenie termina tsifrovizatsiya na zakonodatel'nom urovne [Transformation and consolidation of the term digitalization at legislative level]. *Molodoi uchenyi*. 2019. No. 41 (279). Pp. 9–12. (rus)
15. *Erokhina O.V.* "Umnaya Moskva": novaya kontseptsiya razvitiya stolitsy [Smart Moscow: New development concept]. *Gumanitarnye nauki. Vestnik Finansovogo universiteta*. 2018. No. 3 (33). (rus)
16. Standart vovlecheniya grazhdan v reshenie voprosov razvitiya gorodskoi sredy [Standard for citizen engagement in addressing urban environment development issues]. Moscow, 2020. Pp. 76. (rus)
17. Rossiiskaya Federatsiya. Zakony. O strategicheskoy planirovani v Rossiiskoi Federatsii: Federal'nyi zakon Rossiiskoi Federatsii ot 28 iyunya 2014 g. N 172-FZ [Federal Law of the Russian Federation No. 172-FZ "Strategic Planning in the Russian Federation", June 28, 2014]. (rus)
18. *Tuzovskii V.S.* Stanovlenie ponyatiya Master-plan v otechestvennoi gradostroitel'noi teorii i praktike [The concept of "Master Plan" in the Russian urban theory and practice]. *Noema*. 2019. No. 3-S (3). Pp. 27–29. (rus)

Сведения об авторах

Киншт Александр Владимирович, докт. с.-х. наук, профессор, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, ale-kinsht@yandex.ru

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

Authors Details

Aleksandr A. Kinsht, DSc, Professor, Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, ale-kinsht@yandex.ru

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

УДК 711.581.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-30-40

*Е.И. ГУРЬЕВА, Я.А. БАРАНОВА,
Воронежский государственный технический университет*

ОБОСНОВАНИЕ ИНСОЛЯЦИОННОГО РЕЖИМА И ВЗАИМОВЫГОДНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОН ГОРОДА ЕФРЕМОВА ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. В настоящей работе рассматриваются климатические особенности Ефремовского района и г. Ефремова, в частности, для выявления закономерностей взаимного влияния системы озеленения и территории жилой застройки.

Составлен строительно-климатический паспорт г. Ефремова Тульской области, вследствие чего были установлены закономерности инсоляционного режима городской застройки и расположение функциональных зон города.

Ключевые слова: строительная климатология, строительно-климатический паспорт, инсоляционный режим, климат, зоны рекреации

Для цитирования: Гурьева Е.И., Баранова Я.А. Обоснование инсоляционного режима и взаимовыгодного расположения функциональных зон города Ефремова Тульской области // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 30–40.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-30-40

*E.I. GURYEVA, YA. A. BARANOVA,
Voronezh State Technical University*

INSOLUTION AND IMPROVED LOCATION OF FUNCTIONAL ZONES OF EFFREMOV-CITY IN TULA REGION

Abstract. In this paper, the climatic conditions are considered for the Efremovsky district and the city of Efremov, in particular to identify the mutual effect from the landscaping system and residential development area. The construction-climatic passport is prepared for the city of Efremov in the Tula region. As a result, insolution of urban development and location of functional zones of the city are identified.

Keywords: construction climatology, construction and climatic passport, insolution, climate, recreation zone

For citation: Gur'eva E.I., Baranova Ya.A. Obosnovanie insolyatsionnogo rezhima i vzaimovыgodnogo raspolozheniya funktsional'nykh zon goroda Efremova Tul'skoi oblasti [Insolution and improved location of functional zones of efremov-city in Tula region]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 30–40.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-30-40

Введение

Проблема проектирования городов и реконструкции их жилых территорий в современном градостроительстве приобретает все большее значение. Это сложный многоуровневый процесс, зависящий от многих факторов. Архитектурные, планировочные особенности застройки, сложившиеся ансамбли, влияние природно-экологических условий, транспортная система – это только одна из аналитических частей, предшествующая реконструктивным мероприятиям.

В каждом индивидуальном случае реконструкция территории проводится в соответствии с аналитическим материалом данной территории и только после полного сбора всей информации можно приступать к проектным предложениям и реконструкции. Одним из обязательных к изучению факторов являются строительно-климатические особенности территории застройки.

Строительно-климатический паспорт – это свод метеорологических и геофизических данных, используемых в градостроительной практике. Исходными данными для его составления будут общие и комплексные характеристики или показатели по элементам климата. Анализ имеющегося климатического материала необходим для оценки климата района строительства и установления типологических рекомендаций к проектируемым зданиям, а также размещению других функциональных зон, например зон рекреации. В пособии к СНиП 2.01.01-82 предложена унифицированная форма строительно-климатического паспорта.

Инсоляционный режим – совокупность данных о температурных условиях региона или города, определения продолжительности инсоляции в течение суток, количества радиационного тепла, поступающего через световые проемы в помещение.

Ветровой режим – это ветровые условия, совокупность данных о направлении, скорости, повторяемости ветра и его нагрузки на функциональные зоны города.

Исторически сложилось, что общество строит города близ водоемов, однако делают это исходя из взаимовыгодного расположения элементов ландшафта и особенностей рельефа, характеристик почвы и климатических условий. Рассмотрим данные закономерности на примере малого города Ефремова в Тульской области.

Микроклимат ландшафта Ефремовского района

Район расположен на юго-востоке Тульской области. Площадь района – 1649 км². Общая численность Ефремовского района – 56 199 жителей. Плотность населения – 34,08 чел/кв. км [12] (рис. 1).

Основные реки – Красивая Меча и ее притоки (Дубрава, Вытемка, Любашовка).

Почвы района – черноземы, отличаются высоким плодородием. Лесной фонд невелик и располагается небольшими площадями на территории всего района (рис. 2).



Рис. 1. Положение территории в системе административного устройства. Автор Я.А. Баранова [12]

Ландшафтная схема

Условные обозначения:

- - основные объекты лесного фонда
- - граница Ефремовского района
- - водные объекты

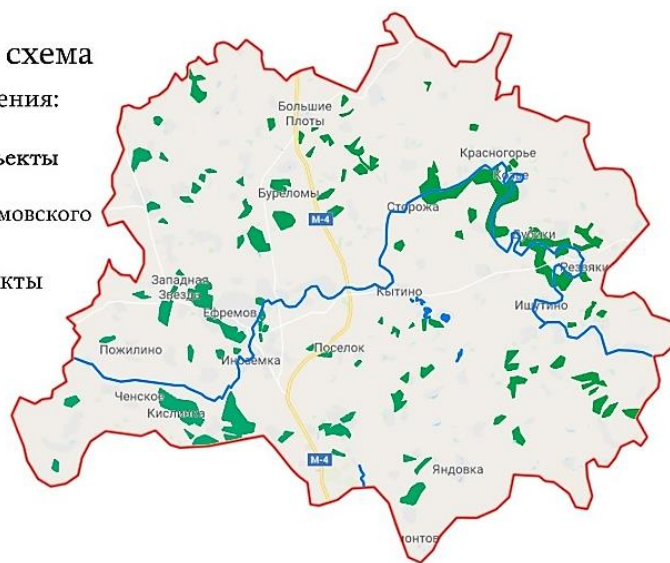


Рис. 2. Ландшафтная схема Ефремовского района Тульской области. Автор Я.А. Баранова [11]

Микроклимат застройки г. Ефремова Тульской области

Западная часть города располагается на относительно пологом рельефе, так же как и юго-восточная часть промышленной зоны, однако центральная

его часть находится на склоне, примыкая к реке с западной стороны. Особо выражены 3 водораздела и 4 тальвега, на одном из которых образовался ручей Медвежий. Самая высокая горизонталь города – 240 м, самая низкая – 150 м.

Город окружен системами озеленения общего пользования, имеет большой потенциал развития этих систем с городской структурой (рис. 3).

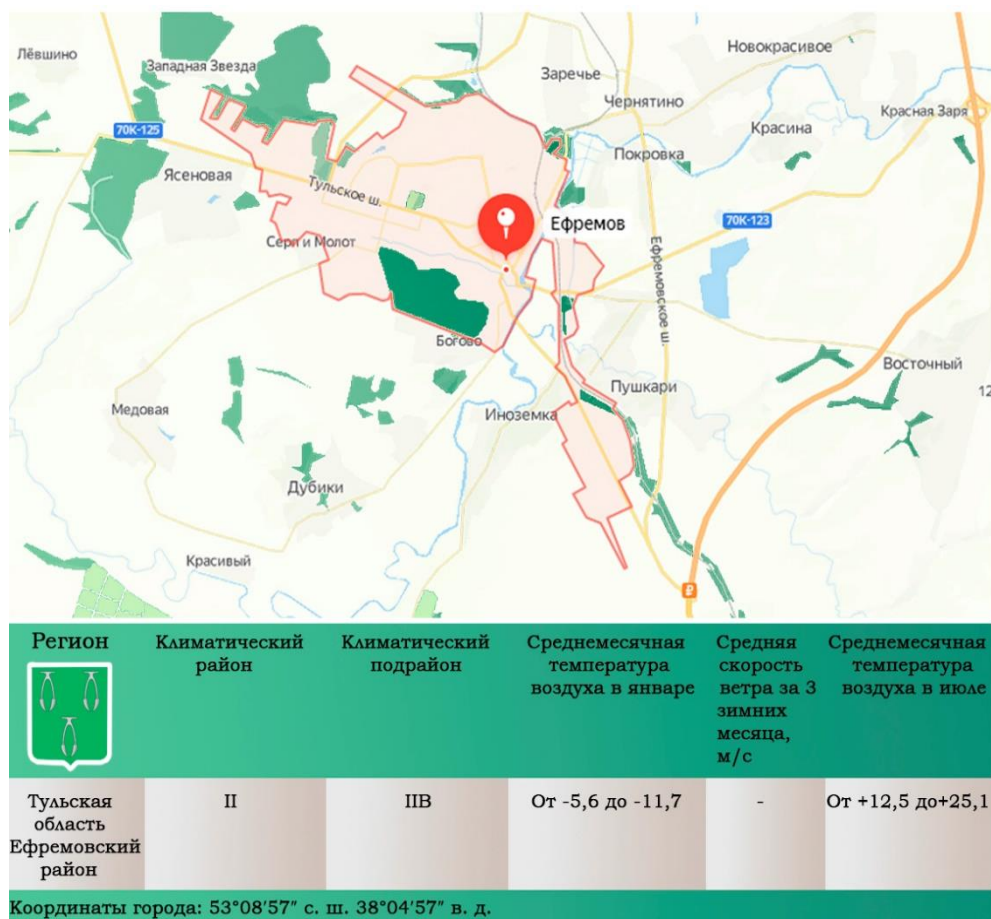


Рис. 3. Общие климатические данные Ефремовского района Тульской области. Автор Я.А. Баранова [10]

Зеленые зоны общего пользования в границах г. Ефремова: городская роща на юге центральной части города общей площадью 180 га; Центральный парк им. Бунина на Тульском шоссе; Комсомольский сквер на ул. Свердлова; сквер им. Космодемьянской на ул. Лермонтова; городской сад, граничащий с улицами Заречная и Воронежское шоссе.

Водные объекты в границах г. Ефремова: р. Красивая Меча, протекающая с северо-востока на юго-запад; ручей Медвежий, текущий с запада на восток; Сухановский пруд на севере центральной части города; р. Уродовка на севере территории.

Инженерно-климатические расчеты г. Ефремова Тульской области

При пофакторном анализе климата большое значение имеет оценка воздействия солнечной радиации (рис. 4).

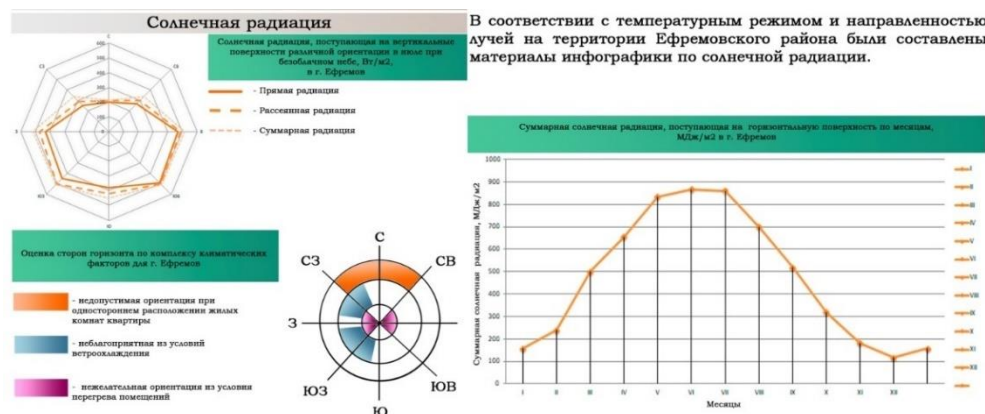


Рис. 4. Анализ солнечной радиации на территории г. Ефремова Тульской области. Автор Я.А. Баранова [9]

Западная часть города ориентирована в основном на юг, что благоприятно для развития жилой застройки. Восточная часть, представленная промышленной зоной, ориентирована преимущественно на север и запад по сторонам света, но за счет функциональности территории не имеет негативных последствий. Исходя из полученных аналитических данных о солнечной радиации, можно сделать вывод, что преобладающим направлением суммарной радиации на территории города является запад и восток, что также отражается на нежелательном ориентировании жилых зон из условия перегрева помещений.

Температурный режим района и города (рис. 5) характеризуется как умеренно континентальный, обусловлен продолжительным летом и умеренно холодной зимой с частыми оттепелями. Средняя температура января, самого холодного месяца года, по нормам 1981–2010 гг. составляет минус 6,8 °С, июля, самого тёплого месяца, – плюс 19,8 °С.

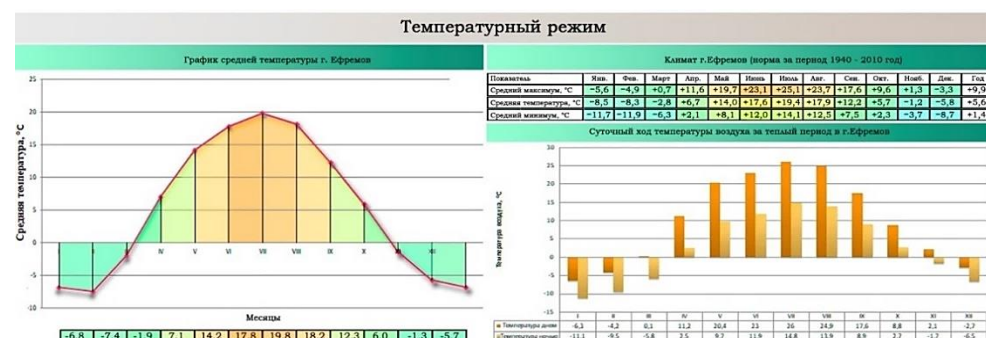


Рис. 5. Анализ температурного режима на территории г. Ефремова Тульской области. Автор Я.А. Баранова [7, 8]

Исходя из градостроительных нормируемых материалов по проектированию и расположению городов в определенных климатических секторах были выявлены основные характеристики уровня влажности г. Ефремова Тульской области (рис. 6).

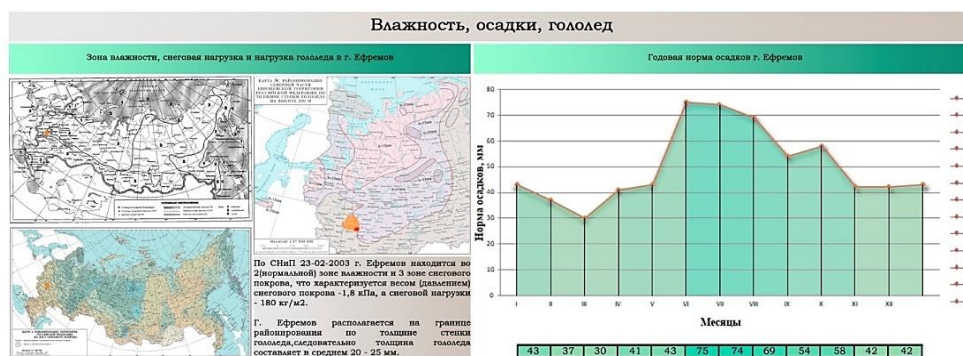


Рис. 6. Анализ влажности, осадков и гололеда – климатических зон на территории г. Ефремова Тульской области. Автор Я.А. Баранова [5, 6]

Частично соблюдается водоохранная зона р. Красивая Меча, что также является дополнительным источником влаги, шириной 50 м от берега, нарушаемая исключительно усадебной застройкой в малом количестве. Юго-восточная часть участка имеет хаотичную структуру застройки, обоснованную кривизной существующего рельефа, снижающейся с запада на восток в сторону р. Красивая Меча.

Большое значение при проектировании имеет комплексная оценка соотношения температуры и ветра. Оценка ветрового режима производилась при всех типах погоды исходя из сочетаний температуры и ветра и их воздействия на организм человека (рис. 7).

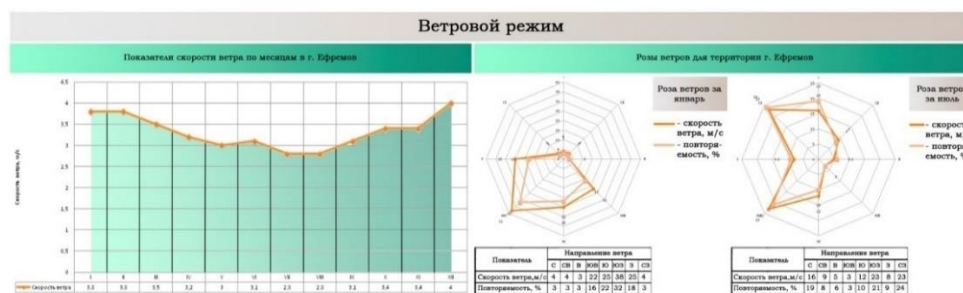


Рис. 7. Анализ ветрового режима на территории г. Ефремова Тульской области. Автор Я.А. Баранова [4]

Оценка погодных условий в различный период года в дальнейшем покажет наиболее выгодные расположения определенных функциональных зон города для избегания негативных тепловых и ветровых нагрузок (рис. 8).

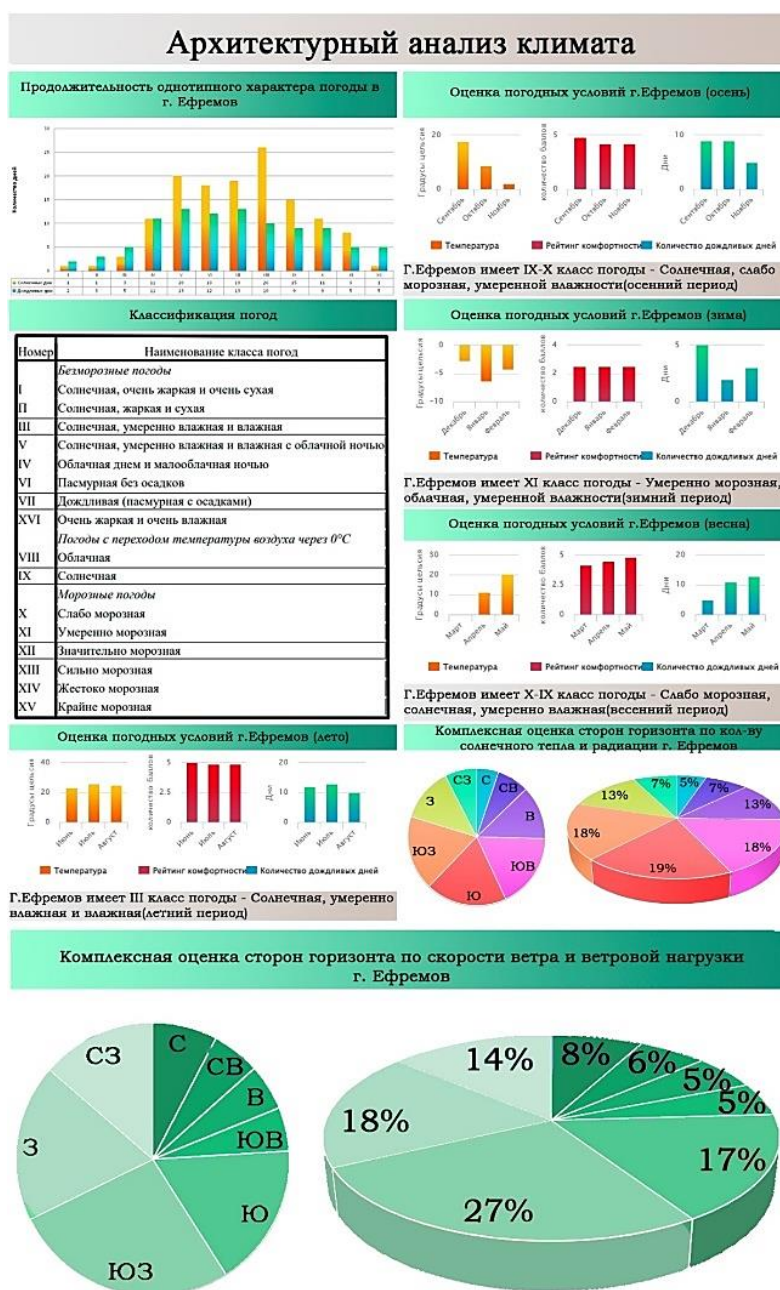


Рис. 8. Архитектурный анализ климата г. Ефремова Тульской области. Автор Я.А. Баранова

Исходя из анализа территории, рельефа и сопоставления с розой ветров г. Ефремова, также можно сделать вывод, что город успешно справился с реализацией промышленного потенциала и правильным размещением производственных зон. Преобладающий западный ветер не оказывает на жилую зону негативных воздействий.

Инсоляция городской застройки и расположение функциональных зон города

Рассматривая инсоляционный режим, следует учитывать взаимосвязь влияния городской застройки на общественные пространства с озеленением и наоборот.

Моделирование местности и рельефа города позволило установить, что при утреннем восхождении солнца (05:00–10:00 ч) жилая зона высокой этажности будет затенять западную территорию с малой этажностью и первые этажи высотных зданий; в дневное время (10:00–16:00 ч) держится относительно равный уровень освещенности на всех участках городской застройки; в вечернее время до заката солнца (17:00–21:00 ч) наблюдается строго противоположная ситуация относительно утреннего периода – западная часть застройки затеняет восточную [1–3]. Время восхода и заката зависит от продолжительности светового дня и времени года (рис. 9–11).



Рис. 9. Взаимное расположения функциональных зон и соблюдение инсоляционного режима на примере Центрального парка им. Бунина в г. Ефремове Тульской области. Автор Я.А. Баранова



Рис. 10. Взаимное расположения функциональных зон и соблюдение инсоляционного режима на примере городской роши в г. Ефремове Тульской области. Автор Я.А. Баранова



Рис. 11. Взаимное расположения функциональных зон и соблюдение инсоляционного режима на примере старого центра в г. Ефремове Тульской области. Автор Я.А. Баранова

Влияние элементов озеленения на жилую застройку в инсоляционном режиме

Защитная функция:

– *Центральный парк им. Бунина* располагается в восточной части новой центральной части города и окружен секционной застройкой средней этажности на юго-западе и севере, частной застройкой на юге. Данное расположение элемента озеленения может быть аргументировано защитной функцией северной части селитебной зоны от ветровых нагрузок, и так как парк не имеет высоких деревьев и расположен в соответствии с градостроительными нормами, он не несет вред жилой застройке при разрушении и падении. *Средний уровень защиты.*

– *Городская роща* – мощный защитный элемент рекреационного значения, расположенный на юге территории города. Данный объект озеленения включает в себя высокие густые деревья на высотной горизонтали рельефа, что значительно уберегает северную и северо-восточную зону жилой застройки от ветровой нагрузки, а также снижает воздействие солнечной радиации на восточную часть усадебной и секционной застройки. *Высокий уровень защиты.*

– *Старый центр города* примыкает к р. Красивая Меча и не имеет достаточного количества элементов озеленения для защиты от ветра, вследствие чего в 2013 г. наблюдалось образование микросмерча на территории города при столкновении юго-западного и северо-восточного ветра. Немногочисленные парки, выполняющие рекреационную функцию, также не способны в полной мере защитить от температурного режима и солнечной радиации. *Низкий уровень защиты.*

Влияние жилой застройки на элементы озеленения в инсоляционном режиме

Жилая застройка в г. Ефремове представлена секционными домами малой и средней этажности с минимальными вкраплениями высотных зданий. Более 50 % территории города занято секционными домами. Исходя из аналитических данных, можно сделать вывод, что селитебная территория влияет исключительно на рекреационные пространства в черте города и не носит негативного характера, т. к. не препятствует ветровому режиму и даже уменьшает световую нагрузку на элементы озеленения в восточной части (пример – Центральный парк им. Бунина).

Заключение

При анализе климатических данных и взаимодействия элементов озеленения и ландшафта с жилой застройкой становится очевидным, что расположение их относительно друг друга должно основываться на правилах инсоляционного режима, т. к. это может нести как положительные последствия, так и отрицательные. Малые города продолжают улучшать и развивать свой потенциал относительно проблемных зон – это касается г. Ефремова. Одной из таких проблем является недостаточное количество объектов озеленения, выполняющих как защитную, так и культурно-развлекательную функцию.

Для того чтобы вариант развития территории был более подходящим, требуется провести: подробный анализ участка, подсчет технико-экономических показателей и их сверку с нормативными показателями, подбор архитек-

турных стилей, создание планировочных вариантов и составление градостроительного ансамбля с учетом взаимосвязи его с окружающей застройкой. Но первостепенной задачей является именно изучение климатических особенностей территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Российская Федерация. Законы.* Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ.
2. *Российская Федерация. Законы.* Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 г. № 136-ФЗ.
3. *СП 82.13330.2016.* Благоустройство территорий. Актуализированная редакция СНиП III-10-75.
4. *СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03.* Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.
5. *СНиП 23-01-99.* Строительная климатология / Госстрой России. Москва : ГУП ЦПП Госстроя России, 2000.
6. *СНиП 2.01.01-82.* Строительная климатология и геофизика / Госстрой СССР. Москва : Стройиздат, 1983.
7. *СП 50.13330.2010.* Тепловая защита зданий / Госстрой России. Москва : ФГУП ЦПП, 2004.
8. *Строительная климатология* : справочное пособие к СНиП / НИИ строит. физики. Москва : Стройиздат, 1990.
9. *СП 20.13330.2016.* Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, 2, 3) от 03 декабря 2016 г.
10. *Пособие по строительной климатологии* (к СНиП 2.01.01-82) / НИИ строительной физики Госстроя СССР. Москва : Стройиздат, 1982.
11. *Классы погоды и климатотерапия.* URL: <http://turizmst.ucoz.ru/graffiti/pr/3.pdf>
12. *Город Ефремов* : [официальный сайт] URL: https://efremov.tularegion.ru/press_center/news/profilakticheskie-meropratiya-s-naseleniem-napravlennye-na-preduprezhdenie-pozharov/

REFERENCES

1. Rossiiskaya Federatsiya. Zakony. Gradostroitel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii [Town-Planning Code No. 190-FZ, 29.12.2004 of the Russian Federation]. (rus)
2. Rossiiskaya Federatsiya. Zakony. Zemel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii [Land Code No. 136-FZ, 25.10.2001 of the Russian Federation]. (rus)
3. SP 82.13330.2016. Blagoustroistvo territorii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP III-10-75 [Construction Rule 82.13330 "SNiP III-10-75 Landscaping"]. (rus)
4. SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03. Sanitarno-zashchitnye zony i sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatii, sooruzhenii i inekh ob"ektov [SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Sanitary protection zones and sanitary classification of enterprises, structures and other objects"]. (rus)
5. SNiP 23-01-99. Stroitel'naya klimatologiya [SNiP 23-01-99. Construction climatology]. Gosstroi Rossii. Moscow, 2000. (rus)
6. SNiP 2.01.01-82. Stroitel'naya klimatologiya i geofizika [SNiP 2.01.01-82. Construction climatology and geophysics]. Gosstroi Rossii. Moscow: Stroyizdat, 1983. (rus)
7. SP 50.13330.2010. Teplovaya zashchita zdaniy [Construction Rule 50.13330.2010 Thermal protection of buildings]. Gosstroi Rossii. Moscow, 2004. (rus)
8. Stroitel'naya klimatologiya: spravochnoe posobie k SNiP [Construction climatology: Reference manual for SNiP]. Moscow: Stroiizdat, 1990. (rus)
9. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeistviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* [Construction Rule 20.13330.2016 Loads and impacts]. Updated version of SNiP 2.01.07-85*, December 03, 2016. (rus)
10. Posobie po stroitel'noi klimatologii (k SNiP 2.01.01-82) [Manual on construction climatology (SNiP 2.01.01-82)]. Moscow: Stroiizdat, 1982. (rus)

11. Klassy pogody i klimatoterapiya [Types of weather and climatotherapy]. Available: <http://turizmst.ucoz.ru/graffiti/pr/3.pdf> (rus)
12. Gorod Efremov [The city of Efremov]. Available: https://efremov.tularegion.ru/press_center/news/profilakticheskie-meropratiya-s-naseleniem-napravlennye-na-preduprezhdenie-pozharov/ (rus)

Сведения об авторах

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

Баранова Яна Александровна, магистрант, Воронежский государственный технический университет. 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, midsunikira@mail.ru

Authors Details

Elena I. Gur'eva, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., 394006, Voronezh, Russia, gurjeva_el@mail.ru

Yana A. Baranova, Graduate Student, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., 394006, Voronezh, Russia, midsunikira@mail.ru

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-41-56

*А.С. КАМЫНИНА, Л.М. РЕЗНИЦКАЯ,**Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета*

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЕКТНУЮ КОНЦЕПЦИЮ АРХИТЕКТУРНОЙ ШКОЛЫ В ТРОНХЕЙМЕ

Аннотация. Задачей проектной концепции новой архитектурной школы в Тронхейме стала модернизация архитектурного образования Европы в XXI в.

Существенными чертами обучения должны быть понимание принципов устойчивого развития, социального контекста и ощущение места при проектировании зданий, трансформация профессионального архитектурного менталитета таким образом, чтобы творческие методы стали частью непрерывного и гармоничного духовного культурного процесса. Среда обучения должна обеспечивать получение знаний и навыков, а также давать стимул для личного развития.

Стремительное изменение среды обитания в XXI в. поставило целый комплекс новых вызовов, проблем, к решению которых должны быть готовы будущие архитекторы. Эти острые проблемы современности являются важнейшим фактором, влияющим на проектные концепции новых архитектурных школ, в том числе школы в Тронхейме.

Ключевые слова: архитектурная школа, архитектурное образование в Норвегии, Тронхейм NTNU, выявление тенденций, подходы к проектированию, модернизация архитектурного образования, инновационная деятельность, архитектурно-пространственная концепция

Для цитирования: Камынина А.С., Резницкая Л.М. Факторы, влияющие на проектную концепцию архитектурной школы в Тронхейме // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 41–56.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-41-56

*A.S. KAMYNINA, L.M. REZNITSKAYA,**Southern Federal University*

FACTORS INFLUENCING THE DESIGN CONCEPT OF TRONDHEIM SCHOOL OF ARCHITECTURE

Abstract. The design concept of the Trondheim School of Architecture is modernization of architectural education in Europe in the 21st century.

Education must include the understanding of principles of sustainable development, social context, place for design of buildings, transformation of the professional architectural mentality to make creative methods a part of continuous and harmonic, spiritual cultural process. The learning environment must provide knowledge and skills and a stimulus for personal development.

The rapid change in the living environment in the 21st century has presented new challenges future architects. These problems most of all affect the design concepts of new architectural schools, including the Trondheim School of Architecture.

Keywords: architectural school, architectural education, Trondheim School of Architecture, trends, design approach, modernization, innovation activity, spatial concept

For citation: Kamynina A.S., Reznitskaya L.M. Faktory, vliyayushchie na proektnuyu kontseptsuyu arkhitekturnoi shkoly v Tronkheime [Factors influencing the design concept of Trondheim School of Architecture]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 41–56.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-41-56

Цель исследования заключается в выявлении факторов, влияющих на концепцию проектирования новой архитектурной школы в Норвегии, г. Тронхейм. Школа будет иметь свою собственную уникальную идентичность, специализированный процесс обучения и пространства будет функционировать как своего рода лаборатория архитектуры. Проектная концепция новой архитектурной школы в Тронхейме связана с рядом факторов, в том числе актуальностью модернизации архитектурного образования Европы в XXI в. Актуальность и важность модернизации архитектурного образования была закреплена в Хартии Юнеско/МСА по архитектурному образованию. Пересмотренная версия 2011 г. – Изменения, принятые XXV Генеральной ассамблеей (Токио, октябрь 2011).

Хартия представляет собой рамочный документ, служащий для руководства и ориентации студентов и преподавателей всех учреждений, связанных с образованием и подготовкой специалистов в области архитектуры и градостроительства. Она задумана как «динамичный» документ, который должен регулярно пересматриваться, следует учитывать при этом новые направления, потребности и достижения в профессиональной практике, а также в системах образования. Целью Хартии является ее применение для создания глобальной сети архитектурного образования, в рамках которой достижения отдельных вузов смогут стать общим достоянием. В Хартии указывается на необходимость подъема уровня архитектурного образования в соответствии с вызовами современности. Существенными чертами обучения должны быть понимание принципов устойчивого развития, социального контекста и ощущение места при проектировании зданий, трансформация профессионального архитектурного менталитета таким образом, чтобы творческие методы стали частью непрерывного и гармоничного духовного культурного процесса. В Хартии указывается на необходимость учета и развития в архитектурной деятельности многообразия культур, которое должно стать всеобщим наследием человечества. Среда обучения должна обеспечивать получение знаний и навыков, а также давать стимул для личного развития [1].

Острые проблемы современности являются важнейшим фактором, влияющим на проектные концепции новых архитектурных школ, в том числе школы в Тронхейме. Перечислим часть из них, оказывающих влияние на структуру образования и, соответственно, концепцию архитектурной школы. Это глобальные проблемы мировой и европейской цивилизации и проблемы архитектуры как вида искусства.

1. Экологические проблемы. Проблемы ограниченности природных ресурсов, требования соблюдения биобалансов.

2. Энергетические проблемы и переход к 2050 г. Норвегии на альтернативные виды энергии. Проектирование среды с положительным энергобалансом. Реализация водородной программы.

3. Проблемы переуплотнения городов и поиск архитектуры городов как смысла человеческого существования.

4. Развитие архитектуры как синтеза целей гражданского общества.

5. Демографические проблемы. Убыль коренного населения, проблемы миграции и реализации программ поликультурности, переход к политике этнокультурного разнообразия, развития многомерности сферы культуры.

6. Проблемы социального неравенства и сегрегации и роль архитектуры в нивелировании проблем.

7. Проблемы глобализации и локалитета в свете потери разнообразия, отражающего жизненные уклады и культурные коды.

8. Проблема формирования навыков архитектурного проектирования согласно цепочке: проблематизация – концепция – проект – средовой объект (система) – здание и сооружение – жизнь здания и сооружения – его утилизация.

9. Проблема устаревания идей архитектуры. Неприменимость части идей прошлого к миру, в котором мы живем. Проблема несоответствия архитектуры разнообразию городской жизни, политических, социальных изменений, запросов различных городских, сельских сообществ, несоответствие архитектуры опыту современного человека, обеспечение свободы выбора в связи с различными образами жизни.

10. Проблематика комплексности архитектурных исследований.

11. Проблемы синтеза архитектуры и виртуальной среды. Развитие архитектуры как пространства коммуникации.

12. Поиск новой архитектуры как морфологии, символики, антропологичности и феноменологии. Навыки создания архитектуры как отражения жизненного мира, современных и вечных смыслов. Поиск новых смыслов архитектуры как связи тела, формы, пространства, времени, движения, света, цвета.

13. Проблема развития новых направлений в самой архитектуре.

14. Проблема формирования архитектора как эксперта гуманитарных проблем культуры.

15. Проблемы развития теории архитектуры.

Создание новой архитектурной школы в Норвегии подразумевает понимание того, что такое архитектурная школа, каковы должны быть ее структура и содержание на основе опыта функционирования известных архитектурных школ Европы. Архитектурной школой можно считать направление, сложившееся в архитектурно-художественном образовании в связи с базовым учебным заведением, осуществляющим целенаправленную подготовку специалистов в области архитектуры и дизайна [2].

На основе отечественного и зарубежного опыта проектирования и функционирования таких известных архитектурных школ, как Баухаус в Дессау; Факультет архитектуры в Порто; Школа архитектуры в г. Нанте, Франция; Школа искусств в г. Айова; Школа архитектуры Барлетт в Лондоне и др., были выявлены основные подходы, принципы, факторы влияния и тен-

денции проектирования архитектурных школ. Данные сведены в табл. 1, где рассматривались следующие параметры:

- размещение в городской среде;
- структура образовательной программы;
- планировочные решения;
- основные функциональные модули;
- интерьерные решения.

На основе анализа выявлены следующие современные тенденции в проектировании архитектурных школ:

1. Размещение объекта предпочтительно в составе городка-кампуса для синтезирования всех образовательных отделений учебного учреждения между собой (Школа искусств, г. Айова, С. Холл, 2006 г.; Колледж искусства и дизайна, OCAD, У. Олсон, 2004 г.; Архитектурная школа Марн-ла-Валле, Б. Чуми; Баухауз, Дессау, В. Гроппиус). Размещение основывается на предпроектном анализе и обеспечении эффективных связей в структуре кампуса, а также с городом.

2. Внедряется сотрудничество вузов с ведущими архитектурными компаниями, ведущими мастерами архитектуры и общественностью (Сенежская студия, 1964–1980 гг., Факультет архитектуры в Порто, А. Сиза; Школа архитектуры, Нант, А. Лакатон, Ж.-Ф. Вассаль, 2008 г.; Школа архитектуры Барлетт, Лондон, Хокинс/Браун, 2014 г.).

3. Объемно-пространственные решения демонстрируют два типа – компактный и блочно-павильонный. Функциональное зонирование предусматривается по блокам и по вертикали. Решение имеет тесную связь с уникальной образовательной программой, вносит позитивный вклад в окружающую среду, часто используются дворовые объединяющие пространства и галереи-переходы. Объемно-пространственное решение демонстрирует новации в области созданий общественных пространств (атриумов, дворовых пространств, эксплуатируемых кровель), работы света в архитектурном пространстве. Они содержат оригинальные технологические, конструктивные и образные решения (Факультет архитектуры в Порто, А. Сиза; Школа архитектуры Барлетт, Лондон, Хокинс/Браун, 2014 г.).

4. В структуре выявляются мастерские, в том числе компьютерного моделирования и 3D-печати, аудио-, видеоарта, библиотеки-медиаотеки, выставочные зоны, экспериментальные проектно-исследовательские лаборатории, презентационные зоны.

5. В планировочном решении отдается предпочтение гибким, мобильным, открытым пространствам для обсуждения рабочих процессов и дискуссий. Установлено использование различных трансформаций: перегородок, модульных элементов для размещения экспозиций, рабочих мест, мастерских (Школа архитектуры Барлетт, Лондон, Хокинс/Браун, 2014 г.; Школа архитектуры, г. Нант, А. Лакатон, Ж.-Ф. Вассаль, 2008 г.). Обязательное наличие центрального объединяющего пространства, где студенты могут выставлять свои работы для общего обсуждения и проводить конкурсы, мастер-классы и выставлять коллективные проекты.

Таблица 1

Сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта проектирования архитектурных школ

Название, автор-архитектор	Местоположение Размещение в городской среде	Структура образовательной программы	Основные функциональные модули	Планировочные решения	Интерьерные решения
Баухауз, В. Гропиус	Дессау, Германия Размещение архитектурной школы в составе университетского городка-кампуса	Художественно-промышленное образование, развитие фантазии, курс по цветоведению, курс «Человек». Каждый учащийся и сотрудник учится одновременно у двух мастеров: мастера-ремесленника и мастера художественной формы. Оба они тесно связаны друг с другом в процессе обучения	Большие мастерские Административная часть Общественная зона с театром и столовой Корпус для проживания студентов Квартиры для преподавателей Техническая школа	Стены и коридоры разделяют пространство на классы для занятий. Менее со- вершенная архитектура явно подчеркивает, что эта часть здания менее престижна, чем остальные [3]	Внутреннее убранство сделано учениками Баухауса. Цвета называют этаж и функции мастерских. Вариации цветов структурируют пространство комнат и выделяют определенные поверхности
Сенежская студия, Е.А. Розенблюм, К.М. Кантор	На восточном берегу Сенежского озера близ г. Солнечногорска во Всеволожном Доме творчества «Сенеж» Союза художников СССР (в настоящее время Дом художников), Россия	Работа Сенежской студии демонстрировала синтез предметного творчества с архитектурой. Обучение предусматривалось в виде двухмесячных семинаров по дизайну. Методика преподавания велась на основе курса «Основы композиции и колористики». Работа основывалась на преподавателе как основе развития композиционного мышления. Занимались не только конструированием различных объектов, но и рисованием, живописью, фотографией. Методика предусматривала, кроме работы над конкретными проектными заданиями, параллельное изучение основ композиции уже под углом художественного проектирования. Обращались к тому, что называется культурным контекстом, к региональной культуре, к представлениям, привычкам, обычаям, традициям, к особым местам и местам, несправедливо лишённым характера и смысла	Учебно-экспериментальная школа Союза дизайнеров «Сенеж» была своеобразными курсами повышения квалификации или переквалификации. Устройство Сенежа было несложным и сводилось к трём-четырёх семинарам в год, два из которых проводились в доме творчества Союза художников. Использовались домики на Сенеже, мастерские, практиковались выездные занятия, которые проходили в других городах и за рубежом, в соцстранах. Длительность семинаров около двух месяцев и завершались выставкой с обсуждениями и публикацией в родственном Сенежу журнале «Декоративное искусство» [4]	Использовались существующие здания и помещения художественного фонда	Использовались существующие здания и помещения художественного фонда

Продолжение табл. 1

Название, автор-архитектор	Местоположение Размещение в городской среде	Структура образовательной программы	Основные функциональные модули	Планировочные решения	Интерьерные решения
		Другим направлением проектной и теоретической работ была музеефикация на основе сценарного моделирования. Проектирование начиналось с того, что тогда и сейчас называлось «сценарием», с описания процессов, действий и ритуалов, формирующих среду			
Факультет архитектуры в Порто, А. Сиза	Порто, Португалия Факультет архитектуры Университета Порту (FAUP) расположен к западу от центра г. Порту на открытой, необособленной территории	Программа, совместно используемая инженерами и архитектурным факультетом Университета Порту (FEUP и FAUP), основана на опыте сотрудничества этих институтов в предыдущие годы и направлена на предоставление студентам теоретических и практических навыков	Административный блок Библиотека Квартиры для преподавателей Сад Мастерские Общественная зона отдыха	Возведение нескольких башен идеально отвечает педагогическим целям программы, делающей акцент на работе в маленьких группах, что предполагает множество небольших классов. Здание имеет форму незамкнутого овала или сужающейся кверху буквы «U», что позволяет создать между внутренней частью и внешним миром пространство, одновременно защищенное и открытое	Архитектор задумал полукруглые выемки, пропускающие дневной свет, который попадает на отражающую поверхность, скрытую навесными потолками. В библиотеке яркий свет попадает в читальный зал, который делит надвое перевернутая застекленная крыша, играющая роль светового фонаря [5]

Продолжение табл. 1

Название, автор-архитектор	Местоположение Размещение в городской среде	Структура образовательной программы	Основные функциональные модули	Планировочные решения	Интерьерные решения
Архитектурная школа, Б. Чуми	Марн-ла-Валле, Франция Расположен в 23 км на восток от Парижа. В составе университетского городка-кампуса	Структура базируется на практике проекта и на приобретении основных концепций и инструментов дисциплины через четыре взаимодополняющие области: историю и теорию, строительство, ландшафт и представление. Он завершается составлением отчета об исследовании, что является настоящим началом исследования	Блоки офисов Мастерские и студии Общественная зона Конференц-зал Библиотека	Концепция состоит в расположении блоковых офисов, мастерских и студий, объединенных вокруг большого центрального застекленного прохода, в котором находятся общие комнаты, конференц-зал и библиотека. На первом этаже есть 2 офисных блока и 4 цеха/студии с аудиториями и кафе-термом в центральном пространстве	Бернар Чуми очень внимательно подошел к выбору материалов и их сочетанию, чтобы создать интересную интерьерную композицию, актуальную для архитектурной школы, основанную на сочетании металла и стекла
Колледж искусства и дизайна, OSCAD, У. Олсон, 2004 г.	Канада, Торонто OSCAD расположен над главным зданием в кампусе Колледжа искусств и дизайна Онтарио, в окружении Грейндж-парка с западной стороны и ул. МакКол на востоке	Развитие индивидуального художественного самовыражения для критического осмысления общества. Основан на знаниях и навыках, позволяющих создавать эффективные, коммуникативные и художественные изображения, которые служат дополнением к письменному слову. Сочетается студийная работа и критический подход	Художественные студии Аудитории Конференц-зал Выставочное помещение Кабинеты преподавателей Оригинальная композиция в постмодернистской традиции, объем, поднятый на опорах в виде огромных карандшей	Здание состоит из двух этажей, поднятых над землей на опорах, соединенных с существующим под ней уровнем лифтами и эскалаторами, которые являются центральным элементом нового вестибюля, соединяя две половинки существующих университетских зданий на всех уровнях. Центральное пространство состоит из холла, где студенты и художники могут выставлять свои работы	Дизайн интерьера носит инновационный характер, что должно привлекать не только внимание окружающих, но и быть вдохновением для студентов колледжа. Металлические конструкции и коммуникации являются частью задумки интерьерного решения

Продолжение табл. 1

Название, автор-архитектор	Местоположение Размещение в городской среде	Структура образовательной программы	Основные функциональные модули	Планировочные решения	Интерьерные решения
Школа искусств, С. Холл, 2006 г.	Айова, США Расположен в г. Айова-Сити штата Айова в составе университетского городка кампуса	Основная идея – помочь студентам развить навыки изучения искусства и визуальной культуры как инструментов познания и человеческого выражения на протяжении всей истории и в современной среде. Степень бакалавра подчеркивает важность развития критического визуального мышления, внимательного чтения и академического письма	Мастерские Аудитории Выставочный зал Администрация Большая столовая	Гибкие пространства открываются из ступеней в теплую погоду. Основные горизонтальные переходы – это места отдыха студентов. Длинные балконы-галереи создают ощущение прозрачности здания	Современный интерьер состоит из стекла и стали с открытыми конструкциями
Школа архитектуры, А. Лакагон, Ж.-Ф. Вассаль, 2008 г.	Нант, Франция Расположена в г. Нанте в окружении городской застройки на острове Иль-де-Нант	Полученная теория сразу имеет применение на практике. Семестровый проект заключается в групповой работе в реальной компании. Два раза в семестр проводятся воркшопы, 3-4 интенсивных дня работы над одним большим проектом	Библиотека Аудитории Выставочный зал Конференц-зал Администрация	С основным пространством здания связаны дополнительные двухэтажные корпуса. По инициативе эти пространства могут быть использованы для самых разных мероприятий и программ. В любой момент возможна адаптация и переделка школы в соответствии с необходимостью	Легкие стальные конструкции зонзируют внутренние помещения, а практически полностью стеклянный фасад делает постройку максимально открытой [6]

Окончание табл. 1

Название, автор-архитектор	Местоположение Размещение в городской среде	Структура образовательной программы	Основные функциональные модули	Планировочные решения	Интерьерные решения
Школа архитекторов Барлетт, Хокинс/Браун, 2014 г.	Лондон, Великобритания Расположен в окружении исторической городской застройки	Школа представляет собой масштабное международное профессиональное сообщество, в работе которого принимают участие ведущие архитектурные институты, такие как Канадский центр архитектуры, Институт архитектуры Южной Калифорнии, известные архитекторы и дизайнеры, представители государственной власти. Все это открывает перед студентами и выпускниками школы безграничные перспективы в развитии и карьере в области градостроительства и урбанистических проектов	Мастерские Аудитории Конференц-зал Администрация Студии Рекреационная зона	Открытые студии должны стимулировать студентов и преподавателей к обсуждениям рабочих процессов и дискуссиям	Важный элемент – деревянная лестница с черными металлическими перилами. Она формирует пространство, выступает осью, на которой держатся все элементы интерьера. Дополнительные места для общения служат мобильные перегородки

6. Лаконизм пластических и цветовых решений (Высшая государственная школа архитектуры, г. Нант, Франция (А. Лакатон и Ж.-Ф. Вассаль, 2008). Размещение студенческих инсталляций в интерьере объекта (Школа искусств, С. Холл, 2006 г.). Акцентирование конструктивных систем в интерьере (Архитектурная школа Марн-ла-Валле, Б. Чуми; Баухауз, Дессау, В. Гроппиус, Нант, А. Лакатон, Ж.-Ф. Вассаль, 2008 г.).

Один из ведущих университетов Норвегии – NTNU, расположенный в Тронхейме, уже имеет архитектурный факультет, нуждающийся в качественном реформировании. В 2020 г. был объявлен международный конкурс на проектирование нового комплекса архитектурной школы в Тронхейме, под который выделен участок. В структуре города Тронхейм университет располагается на нескольких площадках. Проектируемая площадка расположена приблизительно к блоку университетской библиотеки. При анализе участка выявлена транспортная и пешеходная взаимосвязь с другими функциональными блоками университета (рис. 1, 2).



Рис. 1. Транспортная связь объектов университета NTNU и участка проектирования новой архитектурной школы

Группа факторов, влияющих на концепцию архитектурной школы в Тронхейме, связана с местом (страной) и участком проектирования.

1. Влияние градостроительного аспекта: участок расположен в Нордре Хегдален в Тронхейме, рядом с центром здоровья и благосостояния Драгволл. Примыкающие типы застройки к участку проектирования: жилые, институциональные. Площадь участка (без жилой зоны) – 10 135 м², площадь участка (включая жилую зону) – 14 617 м², покрытие земли – 40 %. Участок имеет градостроительное ограничение по высоте – 15 м, свободный от застройки. Рельеф имеет уклон в северном направлении к морю. С восточной стороны расположен

зеленый массив, на северной и западной границах примыкает коттеджная застройка. С южной стороны участка проходит транспортная магистраль, а за ней – объекты кампуса, в том числе библиотека и спортивные корпуса. Близость транспортной магистрали обеспечивает связь с дальними объектами кампуса университета. Расположенные через дорогу объекты кампуса библиотека и спортивный корпус логично включаются в учебную структуру архитектурной школы. Расположение участка на отметках существенно выше береговой линии моря и наличие нижерасположенной застройки средней этажности открывают перспективу организации пленэрных и смотровых площадок на кровле архитектурной школы с видами на морские заливы Тронхейма. Наличие с восточной стороны природного соседства небольшой рощи с выходами батолита и далее сельскохозяйственных угодий также благоприятно для визуального раскрытия проектируемого объекта в восточном направлении.

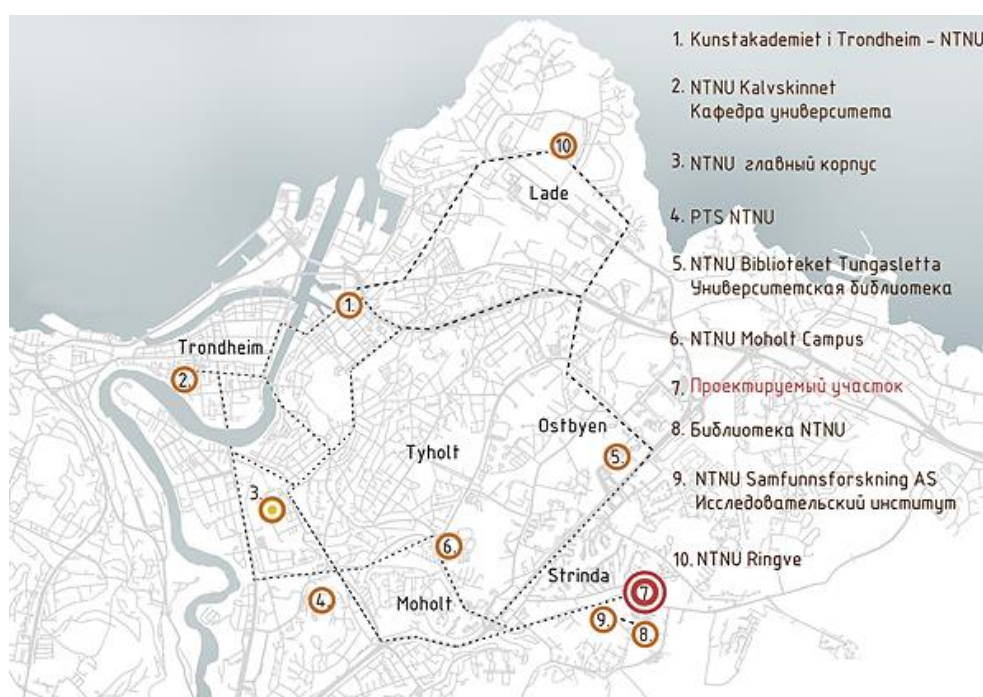


Рис. 2. Схема расположения участка по отношению к другим территориям кампуса университета в структуре г. Тронхейма

2. Морфологический анализ окружающей жилой и общественной застройки выявляет их простые геометrizированные модернистские формы, скатные кровли. Анализ панорамы города со стороны залива показывает живописность композиции простых объемов с поднимающимся от моря рельефом.

3. Композиционный анализ участка выявил главную ось развития проектируемой школы, перпендикулярную прилегающей магистрали и связанную с противоположной стороной, где размещаются объекты Норвежского университета науки и технологий (рис. 3).



Рис. 3. Фото участка

4. Важным фактором являются нормы проектирования Норвегии и градостроительные регламенты г. Тронхейма. основополагающим законодательным актом Норвегии, определяющим общее развитие культурного ландшафта как фактора планировочной организации территории, является закон «О планировании и строительстве». Еврокоды: Основы проектирования (EN 1990); Проектирование сейсмостойких конструкций (EN 1998-1); EN 1992-1-1:2004 (Общие положения для зданий и строительных конструкций); Нормы отступа от жилой и общественной застройки предопределяют характер компоновки архитектурных объемов школы и характер застройки северной границы.

5. Анализ условий восприятия участка – его просматриваемость при езде с магистрали, восприятие прогнозируемого объекта на фоне ландшафта, функциональное статусное предназначение объекта – архитектурная школа, особенности восприятия с уровня Тронхеймского залива – восприятие проектируемого объекта в панораме, являются важным фактором, определяющим необходимость выразительного и сложного объема, вписанного в характер ландшафта.

6. Важным фактором влияния служит характер развития архитектуры Норвегии, ее укорененность в ландшафте, наличие самобытной вернакулярной деревянной архитектуры. Особенностью развития архитектуры Норвегии является ее некий застой по сравнению с общеевропейскими течениями вплоть до XX в., а затем активное развитие модернизма и поистине прорывной современный характер. Развитие одного из важнейших современных подходов в архитектуре феноменологического восходит к работе и творчеству норвежского архитектора, теоретика и историка Кристиана Норберг-Шульца, его книге «Гений места: к феноменологии архитектуры» 1979 г. Айдентика местности и традиции норвежской архитектуры являются существенным фактором, который следует учитывать при проектировании Норвежской архитектурной школы, а также фактор необходимости наличия в школе разнообразных особых пространств,

воспитывающих архитектора, создание обучающего пространства с помощью самой архитектуры, в которой отражаются традиции и новации: создание пустых пространств для воплощения собственных идей студентов [7].

Результаты

С учетом выявленных групп этих факторов были смоделированы 2 модели кампуса (рис. 4 и 5).

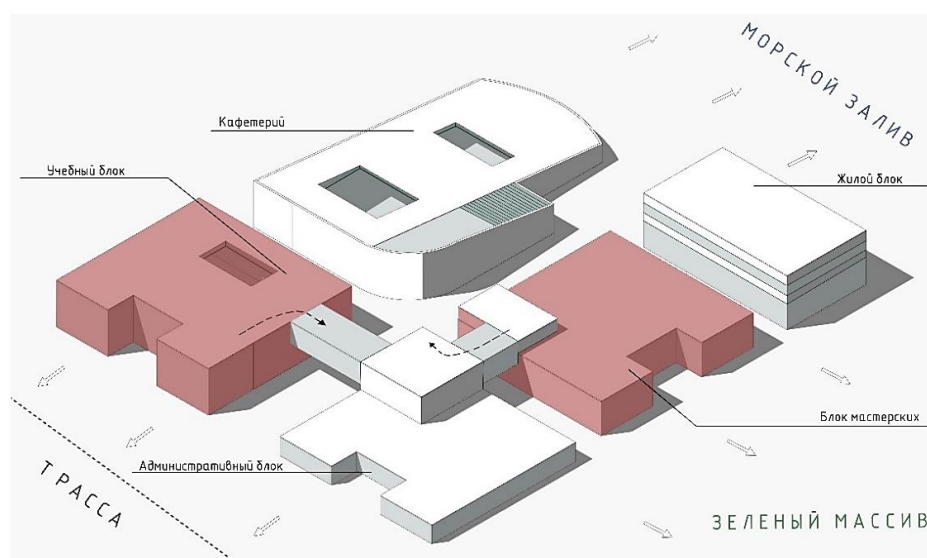


Рис. 4. Модель 1

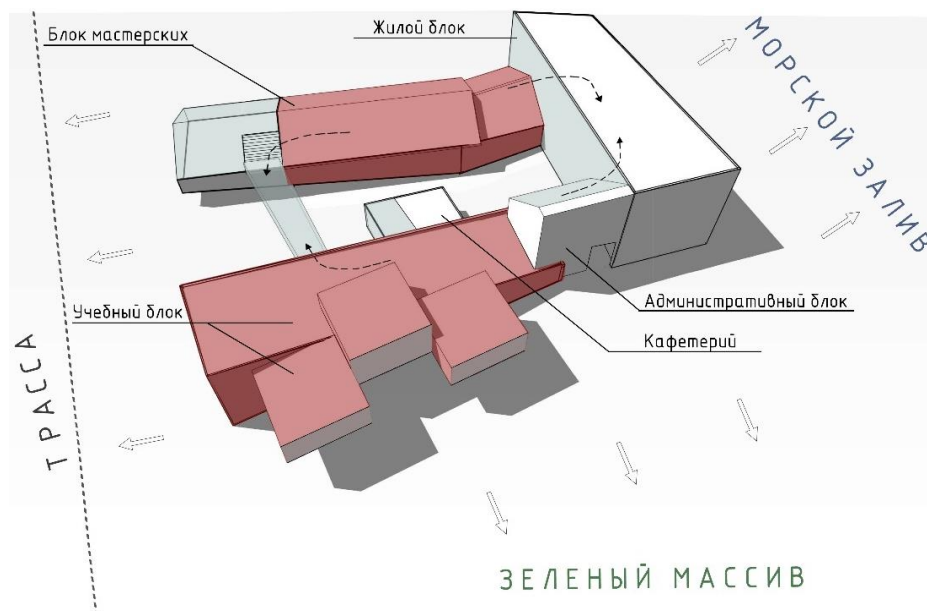


Рис. 5. Модель 2

Архитектурный объект (рис. 4, модель 1) составлен из отдельных объемов. Учебный блок и блок мастерских соединены переходными галереями. В объемной композиции наблюдается нарушение масштабности, отсутствие открытого рекреационного пространства из-за ограничения площади участка.

На рис. 5 каждый из объемов имеет четкое функциональное назначение. Все корпуса связывает согласно проекту переходная галерея. Перед кафетерием расположен амфитеатр по существующим уступам рельефа. Последовательность расположения блоков и их связь друг с другом определяется разработанным «сценарием», имевшим целью сделать удобным и логичным расположение всех корпусов школы. Композиция выделяется динамикой и сложностью решения внутреннего пространства. Она формируется с учетом восприятия со стороны подъезда и подхода с трассы, а также со стороны морского залива (участок входит в панораму застройки) и со стороны лугового пейзажа с восточной стороны. Модель учитывает вид на залив с уровня кровли и включает эксплуатируемую кровлю. Решение обеспечивает более связанную функциональность и доступность зон друг с другом, экономию земли участка проектирования, а также способность архитектурного объекта к видоизменению за счет мобильных пространств.

Выводы

Вывод, основанный на анализе вариантов концептуальной объемно-пространственной организации, показывает: во второй модели – более свободное, объединяющее, центричное дворовое пространство; опора на связь с окружением и градостроительными условиями; четкое распределение функций по корпусам; более тесные взаимосвязи блоков; динамичность форм композиции. В условиях ограниченности территории и особых условий окружения более оптимальной видится вторая модель.

Заключение

Комплексное решение предполагает рассмотрение, учет и синтез больших групп факторов. Для проектирования архитектурной школы в Тронхейме ключевыми факторами являются:

1. Модернизация образовательной программы с учетом вызовов – проблем цивилизации и самой архитектуры. Общество заинтересовано в том, чтобы архитекторы умели понимать региональные особенности и давать практическое воплощение потребностям и ожиданиям людей, улучшая качество жизни отдельных личностей, социальных групп, сообществ и человеческих поселений в целом [8]. Практикой архитектурно-художественного творчества подтверждается, что креативность и новаторство – это две составляющие в основе творческого развития архитектурно-художественного мышления, мировоззрения, концепции и архитектурного образования будущего [9].

2. Методы образования и способы подготовки архитекторов. Они должны различаться в целях поддержания богатства культур и допускать гибкость при составлении учебных планов, чтобы успешнее отвечать меняющимся запросам и потребностям заказчика и пользователей (включая методы выполнения строительного проекта), а также учитывать требования строительной

промышленности и архитектурной профессии, отображая в то же время политические и финансовые мотивации, лежащие в основе всех происходящих изменений [10].

3. Выявленные тенденции и новации в проектировании архитектурных школ.

4. Специфика и особенности норвежской архитектуры. Чуткость к природе, осознание понятий духа места.

5. Глубокая экологичность, включая рациональное использование природных ресурсов.

6. Фактор особой функционально-пространственной среды для творческого развития. Разнообразие, многофункциональность, гибкость, адаптивность, мультимедийность учебных и рекреационных пространств, обеспечивающих возможность воплощения собственных проектов на практике в стенах кампуса и его открытых экспериментальных площадках [11]. Организация архитектурного образования как целостной системы деятельности архитектора должна учитывать принципиальные изменения, которые под влиянием общественного развития и научно-технических, экономических и социальных прогнозов происходят в характере деятельности архитектора [12].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крашенников А.В. Специалист по архитектуре или архитектор? // Московский архитектурный институт. 2017. № 2 (222). URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29729133> (дата обращения: 20.01.2022).
2. Прохоров С.А. История становления архитектурных школ: художественная составляющая в архитектурном образовании // Известия Алтайского государственного университета. 2012. № 2-1. С. 170–174.
3. Комплекс Баухауз в Дессау. URL: <http://archi-story.ru/bauhaus/> (дата обращения: 10.01.2022).
4. Глазачев В.Л. Опыт Сенежской студии // Проблемы дизайна. 2004. URL: http://www.glazachev.ru/publications/articles/2004-03-11_opyt_senezh_studii.htm. (дата обращения: 15.01.2022).
5. Факультет архитектуры Университета Порту через объективы Фернандо Гуэрры. URL: <https://rus.architecturaldesignschool.com/faculty-architecture-university-porto-through-fernando-guerras-lenses-47476> (дата обращения: 23.12.2021).
6. Школа архитектуры в Нанте. URL: <https://archi.ru/projects/world/7819/shkola-arkhitektury-v-nante> (дата обращения: 15.01.2022).
7. Norberg-Schulz Ch. Intentions in Architecture. Cambridge : Mass., MIT Press, 1965. 242 p.
8. John Graby Registrar. Standard of Knowledge. Skill and Competence for Practice as an Architect // The Royal Institute of the Architects of Ireland. 2009. URL: https://bregforum.files.wordpress.com/2014/03/riai_standard_knowledge_skill_competence_architect1.pdf (дата обращения: 20.01.22).
9. Бархин Б.Г. Методика архитектурного проектирования. Москва : Стройиздат, 1993. URL: <https://cih.ru/a1/m8.html> (дата обращения: 19.03.22).
10. Багрова Н.В. Современные технологии и методики в архитектурно-художественном образовании : автореферат на соискание ученой степени / Багрова Наталья Викторовна. Барнаул, 2010.
11. Otero-Pailos J. Architectural Phenomenology and the Rise of the Postmodern // The SAGE Handbook of Architectural Theory. London : SAGE, 2012. P. 136–151.
12. Пучков М.В. Принципы организации образовательного пространства. Архитектурные школы и школы дизайна // Архитектон: известия вузов. 2011. Декабрь. № 36.

REFERENCES

1. Krashennikov A.V. Spetsialist po arkhitekture ili arkhitekto[r]? [Specialist in architecture or architect?]. *Moskovskii arkhitekturnyi institut*. 2017. No. 2 (222). Available: <http://elibrary.ru/item.asp?id=29729133> (accessed January 20, 2022). (rus)
2. Prokhorov S.A. Istoriya stanovleniya arkhitekturnykh shkol: khudozhestvennaya sostavlyayushchaya v arkhitekturnom obrazovanii [History of formation of architectural schools: Artistic component in architectural education]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012. (rus)
3. Komplex Baukhauz v Dessau [The Bauhaus complex in Dessau]. Available: <http://archi-story.ru/bauhaus/> (accessed January 10, 2022). (rus)
4. Glazychev V.L. Opyt Senezhskoi studii [Experience of Seneg Studio]. *Problemy dizaina*. 2004. Available: www.glazychev.ru/publications/articles/2004-03-11_opyt_senezh_studii.htm. (accessed January 15, 2022). (rus)
5. Fakul'tet arkhitektury Universiteta Portu cherez ob'ekty Fernando Guerry [Faculty of Architecture at the University of Porto through the lens of Fernando Guerra]. Available: <https://rus.architecturaldesignschool.com/faculty-architecture-university-porto-through-fernando-guerras-lenses-47476> (accessed December 23, 2021). (rus)
6. Shkola arkhitektury v Nante [Nantes School of Architecture]. Available: <https://archi.ru/projects/world/7819/shkola-arkhitektury-v-nante> (accessed January 15, 2022). (rus)
7. Norberg-Schulz Ch. Intentions in Architecture. Cambridge: MIT Press, 1965. 242 p.
8. John Graby Registrar. Standard of knowledge. Skill and competence for practice as an architect. The Royal Institute of the Architects of Ireland. 2009. Available: https://bregsforum.files.wordpress.com/2014/03/riai_standard_knowledge_skill_competence_architect1.pdf (accessed January 20, 2022).
9. Barkhin B.G. Metodika arkhitekturnogo proektirovaniya [Methodology of architectural design]. Moscow: Stroiizdat, 1993. Available: <https://cih.ru/a1/m8.html> (accessed March 19, 2022). (rus)
10. Bagrova N.V. Sovremennye tekhnologii i metodiki v arkhitekturno-khudozhestvennom obrazovanii: avtoreferat na soiskanie uchenoi stepeni [Modern technologies and methods in architectural and art education. PhD Abstract]. Barnaul, 2010. (rus)
11. Otero-Pailos J. Architectural phenomenology and the rise of the postmodern. The SAGE Handbook of Architectural Theory. London: SAGE, 2012. Pp. 136–151.
12. Puchkov M.V. Printsipy organizatsii obrazovatel'nogo prostranstva. Arkhitekturnye shkoly I shkoly dizaina [Principles of organizing educational space. Schools of architecture and design]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2011. No. 36. (rus)

Сведения об авторах

Камынина Анастасия Сергеевна, магистр, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, arch.nast.kamynina@gmail.com

Резницкая Лариса Мартыновна, доцент, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, leo-lara19@yandex.ru

Authors details

Anastasia S. Kamynina, MSc, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str. 344006, Rostov-on-Don, Russia, arch.nast.kamynina@gmail.com

Larisa M. Reznitskaya, A/Professor, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str. 344006, Rostov-on-Don, Russia, leo-lara19@yandex.ru

УДК 711.4-163; 004.942

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-57-71

*Е.Д. БЕГЕЙ, О.О. СМОЛИНА,
Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет*

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОВЕДЕНИЯ КОНФИГУРАЦИОННОГО АНАЛИЗА НА ТЕРРИТОРИИ ЗАСТРОЙКИ Г. НОВОСИБИРСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ DEPTHMAP

Аннотация. Градостроительная деятельность базируется на комплексе методик и принципов проектирования, которые со временем корректируются под воздействием новых научных исследований, отсюда очевидна важность пополнения отечественных научных знаний зарубежными теориями и практиками. Конфигурационная теория пространственного синтаксиса может считаться ценным ресурсом для отечественной научной школы, исследующей городскую морфологию.

Цель: разработка методики реновации открытых городских пространств в условиях застроенных территорий г. Новосибирска на базе программного обеспечения Depthmap, позволяющего провести анализ пешеходного движения.

Задачи: изучить виды конфигурационного анализа пешеходных пространств и их ограничения; разработать научно-практические рекомендации по применению конфигурационного анализа на застроенных городских территориях; определить уровень корреляции результатов конфигурационного анализа с действительностью; разработать идентификаторы свойств пространств, основывающиеся на физических параметрах, полученных при конфигурационном анализе.

Научная новизна: авторская классификация открытых пространств типовых застроек с использованием данных о пространственных характеристиках, полученных при помощи конфигурационного анализа.

Методы: анализ отечественных и зарубежных данных; изучение программного обеспечения, позволяющего выполнить задачи исследования; анализ данных натурных обследований; применение градостроительного и конфигурационного анализа.

По результатам анализов территории застройки выявлены принципы пространственной теории, определены ограничения конфигурационной модели, с которой можно работать в программном обеспечении Depthmap.

Сформирована гипотеза для будущих исследований, заключающаяся в практической пользе аналитического аппарата пространственной теории в определении метрической и топологической целостности локально-целостных градостроительных образований.

Ключевые слова: городская морфология, конфигурационный анализ, пространственный синтаксис, программное обеспечение Depthmap, графовая модель, пространственная связность, интеграция, изовист, шаговая глубина

Для цитирования: Бегей Е.Д., Смолина О.О. Особенности и перспективы проведения конфигурационного анализа на территории застройки г. Новосибирска с использованием программного обеспечения Depthmap // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 57–71.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-57-71

E.D. BEGEY, O.O. SMOLINA,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering

CONFIGURATIONAL ANALYSIS OF NOVOSIBIRSK'S DEVELOPMENT AREA USING DEPTH MAP SOFTWARE

Abstract. *Purpose:* The purpose of this work is to develop a methodology for the renovation of open urban space in the development area of the city of Novosibirsk using Depth Map software, which allows for the pedestrian traffic analysis. *Methodology/approach:* The analysis of Russian and foreign data, 2) study of software for conducting required research, 3) the analysis of field research data, 4) urban planning and configurational analyses. *Research findings:* Russian studies do not offer such a configurational approach. Most of the studies that consider pedestrian space, represent pedestrian traffic from point A to point B, while in other studies the movement is a more complex symbiosis of social activities not only without goal-setting, but also without specific choice. *Practical implications:* A hypothesis is suggested for future research, which implies the usefulness of the analytical apparatus of spatial theory to determine the metric and topological integrity of locally integral urban formations. *Originality/value:* Classification proposed for open space of typical development areas using data on spatial characteristics obtained by the configurational analysis.

Keywords: urban morphology, configurational analysis, spatial syntax, Depth Map software, graph model, spatial connection, integration, isovist, step depth

For citation: Begey E.D., Smolina O.O. Osobennosti i perspektivy provedeniya konfiguratsionnogo analiza na territorii zastroiki g. Novosibirska s ispol'zovaniem programmnoho obespecheniya Depthmap [Configurational analysis of Novosibirsk's development area using Depth Map software]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 57–71.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-57-71

Введение

Изучение городской морфологии активно ведется с первой половины XX в. разными специалистами: историками, географами, градостроителями, архитекторами и др. Для развития городской морфологии в Германии решающими были первые три десятилетия, они начались с работ Шлютера (1899) и Ратцеля (1903) и были завершены работами Гайслера (1924) и Мартини (1928) [1].

Морфологические исследования городов в Австралии, проводимые с 1960-х гг., по большей части касались первоначальных планов, подготавливаемых колониальным правительством в течение XVII и XIX вв., и того, как эти планы повлияли на последующую эволюцию элементов и форм городов [2].

Основное развитие городской морфологии в Канаде началось после основания Канадской ассоциации географов в 1950 г. [3].

Питер Дж. Ларкхэм в своей статье «Изучение городской формы в Великобритании» отмечает, что с 1970-х гг. исследования были тематическими и узконаправленными, лишенными взаимодействия с пользователями исследований или политикой, за исключением работ по сохранению культурного наследия [4].

Ученые, занимающиеся исследованием морфологии городов, понимают, что форма и конфигурация города, даже если и не является главной причиной

возникающих негативных процессов, может являться мощным катализатором их возникновения. Учитывая, что город представляет собой физическую модель, наполненную теми или иными процессами, мы можем описать эту модель, проанализировать и отыскать взаимосвязь физических показателей с экологическими, экономическими и социальными явлениями. Если подобного рода корреляции возможно найти, значит можно моделировать и прогнозировать работу проектируемой морфологической единицы или структуры в целом. Кроме того, поиск взаимосвязи между физическими показателями также может дать ответ на вопросы, как проектные решения влияют на социальные аспекты города, почему те или иные проектные решения оптимальны или неэффективны, как определить оптимальные методы проектирования, какую конфигурацию и протяженность пешеходного каркаса выбрать для создания устойчивой среды жизнедеятельности населения.

Одной из задач конфигурационной теории пространственного синтаксиса (пер. с англ. Space Syntax) [5], сформулированной Биллом Хиллером, является поиск взаимосвязи между формой городских открытых пространств с показателями видимости и поведением человека. На основе ряда исследований были сформулированы функции, описывающие поведение людей, которые легли в основу программного обеспечения Depthmap [6], именно посредством этой программы проводится расчет и анализ территории застройки г. Новосибирска.

Цель научного исследования заключается в разработке методики реновации открытых городских пространств в условиях застроенных территорий г. Новосибирска на базе программного обеспечения Depthmap, позволяющего провести анализ пешеходного движения участников среды.

Данное исследование направлено на то, чтобы изучить теоретические материалы, касающиеся поведения и перемещения людей внутри городской среды; освоить программное обеспечение, способное эффективно провести пред- и постанализ; осуществить сравнительную характеристику; выявить задачи, которые возможно решать описанным программным обеспечением; проиллюстрировать использование самой эффективной программы Depthmap в практических задачах.

Научная новизна исследования заключается в авторской классификации открытых пространств типовых застроек с использованием данных о пространственных характеристиках, полученных при помощи конфигурационного анализа.

Методы

Анализ в программном обеспечении Depthmap можно осуществить на основе осевой и сегментной карт. Осевая карта состоит из осевых линий, которые представляют собой максимальное осевое удлинение любой точки по прямой линии. Осевая карта (рис. 1, *а*) – это наименьший набор осевых линий, которые проходят через каждое выпуклое пространство [7]. Основным принципом построения осевой карты – минимизировать количество линий и угловое изменение между любыми парами линий. Осевая карта может быть трансформирована в сегментную карту (рис. 1, *б*) путем разбиения осевых линий в местах их пересечения на сегменты.

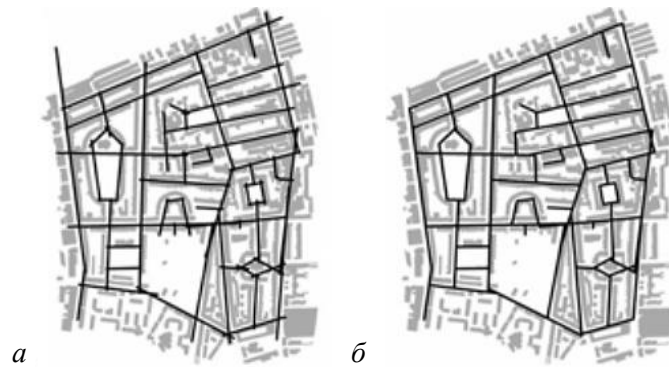


Рис. 1. Осевая (а) и сегментная (б) карты

В рамках научного исследования подробнее будут рассмотрены только те виды анализа, которые основаны на сегментной карте.

В широком смысле конфигурационный анализ – анализ графовой модели, где вершины графов могут представлять собой пространства в том или ином виде. В конфигурационном сегментном анализе граф представляет собой пространство, отделяемое от других значимой физически выраженной границей, которая может содержать физическую связь с другими пространствами.

Моделью конфигурационного анализа является прямоугольная сеть графов (VGA-график) с заданным шагом, которая распространяется в пространстве между физически непроницаемыми преградами пространственной карты (рис. 2).



Рис. 2. Пример графовой сети

Следует назвать определяемые параметры пространства.

Пространственная связность (пер. с англ. Connectivity) – выражает площадь всего пространства, видимого с предметной точки на плане, выраженного числом других предметных точек, с которыми непосредственно связано указанное местоположение [8].

Интеграция (пер. с англ. Integration) – численная мера, предназначенная отразить релятивизированную асимметрию. Данная мера показывает, насколько

ко глубоко или близко в топологическом смысле пространство расположено по отношению ко всем остальным пространствам. Различают глобальную интеграцию и интеграцию с заданным шагом (пер. с англ. Integration HH Rn), которая будет подробнее рассмотрена ниже. На рис. 3 отражен простой пример интеграции пространств.

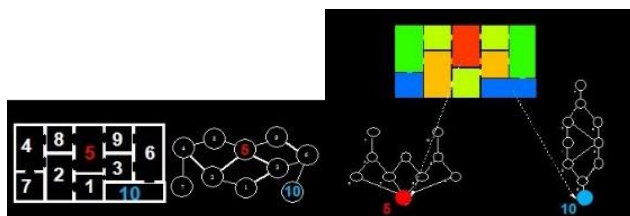


Рис. 3. Схема интеграции пространств, где красный цвет выражает максимальное значение, т. е. показывает, насколько глубоко расположено пространство, а синий – минимальное, т. е. показывает близко расположенное пространство

На основе полученных данных возможно выделить «ядро интеграции» – пространства с максимальным значением интеграции, например 10 % наибольших значений системы. Считается, что интеграция соответствует показателям социальной активности и розничной деятельности [9].

Метод 1. Анализ изовиста (или видимости) впервые представлен Бенедиктом в 1979 г. [10], где изовист представляет собой область в пространственной среде, видимую из расчетной точки. Изовист можно представить в виде физического тела (замкнутый многоугольник), следовательно, он имеет геометрические свойства, такие как площадь и длина периметра. Изовисты также могут быть построены из области (например, из области вокруг фасада) для отображения поля видимости из неё. Набор изовистов также может быть составлен из отрезков пути с равными промежутками времени, чтобы продемонстрировать, как меняется пространство вокруг пользователя, движущегося, например, из пространства с высокой интеграцией к пространству с низкой интеграцией. Множество изовистов, которые покрывают этот путь, обычно называют моделью Минковского [11]. На рис. 4 представлены три основных типа застройки г. Новосибирска, на базе которых будут производиться расчеты: *линейный* (полузакрытый), *периметральный* (закрытый), *локальный* (открытый). Для каждого типа построены схемы изовистов, которые демонстрируют видимость из расчетных точек застроек.

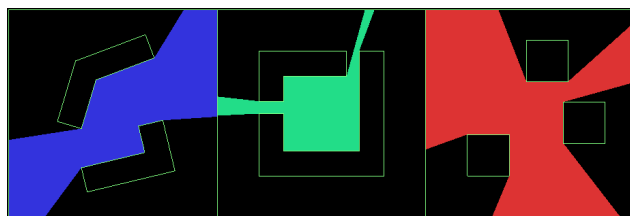


Рис. 4. Схема построения изовистов, где синий цвет демонстрирует линейную видимость, зеленый цвет – периметральную видимость, красный цвет – локальную видимость

Результат: исходя из полученных расчетов анализа изовиста (или видимости) выявлено, что самой комфортный тип застройки для городского жителя, в рамках данного анализа, – это локальный (открытый), т. к. он открывает большой обзор и возможность для рассредоточения людей в зависимости от их потребностей в интеграции с другими пространствами. Наименее эргономичным (комфортным) с точки зрения видимости окружающей среды является периметральный (закрытый) тип.

Метод 2. Данный расчет выбранных участков производится для определения *шаговой глубины* территорий (рис. 5). Шаговая глубина (пер. с англ. Step Depth) представляет собой число оборотов (изменений прямолинейной траектории), необходимое для перехода из текущего местоположения в любое другое местоположение в плане. Все, что непосредственно видно из начальной точки, находится на глубине со значением один, на глубине два находится всё то, что видно после изменения траектории в области со значением один, и так далее по всему плану. Стандартно рассчитывается визуальная глубина шага расчетной точки (пер. с англ. Visual Step Depth). Необходимо обратить внимание, что *визуальная глубина* является мерой «кратчайшего пути» через граф. Мак Элхинни пишет: «Вы можете поворачивать множество раз, чтобы попасть в любое место на графике, но на кратчайшем пути от одного узла к другому вы делаете как можно меньше поворотов» [11].

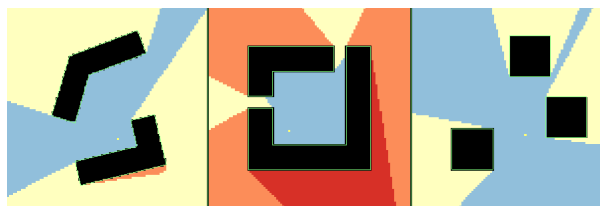


Рис. 5. Схема показателя визуальной шаговой глубины для одной точки в пространстве, где бирюзовый цвет имеет значение 1, зеленый 2, желтый 3 и красный 4, где значение 1 – все, что непосредственно видно из начальной точки, а значение 4 – все, что видно после изменения траектории в области со значением три

Результат: анализируя данные, полученные при расчете, можно наблюдать, что кратчайших путей больше при локальном (открытом) типе застройки, что дает пешеходам возможность экономить время, затраченное на перемещение, в то время как периметральный (закрытый) тип застройки, наоборот, вынуждает пешеходов совершать максимальное число поворотов, которые удлиняют путь следования до конечной точки.

Метод 3. Глобальная визуальная связность, являющаяся аналогом пространственной связности, представляет собой количество неразрывных связей вершины графа с любой другой вершиной во всей системе, в то время как «ограниченная визуальная связность» определяет количество неразрывных связей вершины графа с другими в определенном радиусе (рис. 6).

Результат: данная схема демонстрирует, что локальная (открытая) застройка имеет наибольшую пространственную связанность с окружающей территорией и не создает закрытых и непросматриваемых мест, в то время как

периметральная (закрытая) застройка как раз ограничивает связи пространств, что в последующем влечет за собой создание небезопасных территорий города, в которых жители будут чувствовать себя незащищенными и которые будут стараться избегать.

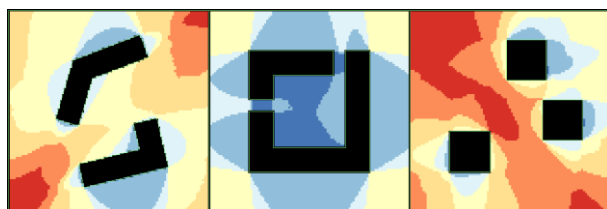


Рис. 6. Схема глобальной визуальной связности, где красный цвет выражает максимальное значение, т. е. показывает минимальное число изменений прямолинейной траектории, а синий – минимальное, т. е. показывает максимальное число изменений прямолинейной траектории

Метод 4. В рамках анализа отношений видимости возможно получить следующие показатели:

1. *Средняя глубина* (пер. с англ. Mean Depth) рассчитывается для каждого узла так же, как при анализе глубины шага (рис. 7). Кратчайший путь (наименьшее количество поворотов) через граф видимости рассчитывается для каждого другого узла в графе. Они суммируются и делятся на количество узлов в графе (минус рассматриваемый нами узел).

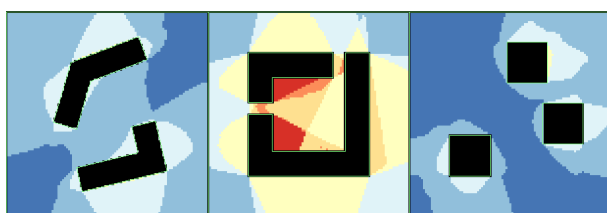


Рис. 7. Схема средней глубины, где красный цвет выражает самое глубокое пространство

Результат: данная схема иллюстрирует, что в периметральной (закрытой) территории застройки с точки зрения отношений видимости самыми опасными и потенциально небезопасными зонами будут именно те, которые плохо просматриваются снаружи зданий, и чем уже проходы в застройку, тем меньше угол просматриваемости, а показатели линейной (полузакрытой) и тем более локальной (открытой) территорий застройки демонстрируют максимально просматриваемые зоны, что располагает пешеходные потоки для размещения.

2. *Интеграция* (пер. с англ. Integration) уже упоминалась ранее и также различает глобальную и интеграцию с заданным шагом (Integration HH Rn) с тем лишь отличием, что правило расчета применяется ко всей графовой сети. Эта мера по существу является нормализованной версией средней глубины. *Нормализация* – это процедура, позволяющая сопоставить различные си-

стемы друг с другом путем принудительного переназначения величин в диапазоне от 0 до 1. Затем эти величины делятся на число, называемое значением d [11], что должно учитывать факт, что по мере роста осевых графиков они также становятся менее интегрированными из-за того, как линии пересекаются. Таким образом, компактная и небольшая по площади система всегда выглядит более интегрированной, чем большая. Depthmap просто принимает значение d и применяет его к VGA-графикам, результат в программе называется «Интеграция (НН)».

Результат: сопоставляя результаты расчетов, можем заметить, что эта схема обобщает данные для периметрального (закрытого) типа застройки и не дает более конкретных результатов поведения пешеходов в отличие от графика средней глубины выше (рис. 8).

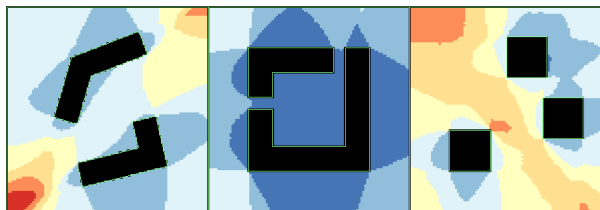


Рис. 8. Схема интеграции НН с радиусом 20 вершин графа, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее сильную интеграцию в пространство, а синий – минимальное, показывающее слабую интеграцию в пространство

Де Арруда Кампос и М.Б. Фонг более детально исследуют применение значения d к VGA-графам и предлагают другое, p -значение [12] (рис. 9).



Рис. 9. Схема интеграции по p -значению с радиусом 20 вершин графа, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее большую востребованность у пешеходов, а синий – минимальное, показывающее меньшую востребованность у пешеходов

Результат: при данном p -значении получаем более подробную схему интеграции, в которой результаты расчета коррелируют со схемой средней глубины пространства. Следовательно, наш вывод для разных конфигураций застройки г. Новосибирска дополняется еще тем фактом, что помимо плохо просматриваемых зон модели меньшую востребованность у пешеходов имеют еще и максимально ограниченные строениями участки пути, в которых человек не может увидеть, что его ждет впереди, и не имеет более двух траекторий движений. Такими некомфортными для человека местами, особенно в случае

периметральной (закрытой) территории застройки, как правило, служат арки или узкие проходы между домами. Такие места опасны потому, что именно в них и совершается большинство преступлений по путям следования пешеходов, как раз таки по причине ограниченности интеграции в среду.

Depthmap также рассчитывает другой вариант интеграции, который называется «Интеграция (Tekl)» [13].

Результат: Текленбург и его коллеги были также заинтересованы в нормализации осевых карт, но масштабирование, которое они используют, является более общим и простым с использованием логарифмического масштаба (рис. 10).

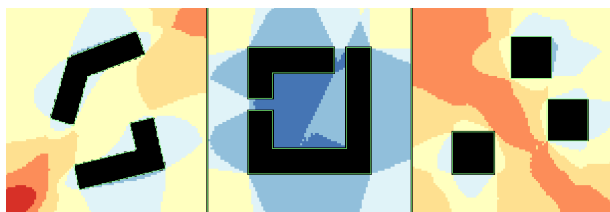


Рис. 10. Схема интеграции (Tekl) с радиусом 20 вершин графа, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее большие пешеходные потоки, а синий – минимальное, показывающее меньшие пешеходные потоки

3. *Визуальный контроль* (пер. с англ. Visual control / Control (X_v)) выражает визуальное «доминирование связности»; степень релевантности, которую каждое пространство представляет для своих ближайших соседей в качестве пространства для перехода [14]. Показатель увеличивается по мере охвата изовистом областей пространства, которые имеют меньшие (более изолированные) изовисты, чем он сам (рис. 11). Для контроля каждому местоположению сначала присваивается индекс того, сколько он может видеть, обратный его связности. Затем для каждой точки индексы, которые она может видеть, суммируются.



Рис. 11. Схема визуального контроля, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее полный визуальный контроль, а синий – минимальное, показывающее частичный визуальный контроль

Может показаться, если локация имеет большое поле зрения, она охватит много точек для суммирования, поэтому показатель визуального контроля будет высоким. Однако если охваченные точки также имеют большие визуальные поля, то это мало способствует визуальному контролю, поэтому контролирующую

щая точка должна охватывать не просто большое количество других точек, а такие точки, которые малы относительно контролирующей.

Результат: таким образом, благодаря данной схеме можно резюмировать, что максимально долго визуальный контроль пешеход чувствует при хождении вдоль периметрального (закрытого) и линейного (полузакрытого) типов застройки, в то время как при локальном (открытом) визуальный контроль прерывистый и его показатели часто сменяются, что вызывает дискомфорт и повышенную тревожность при перемещении.

4. *Управляемость* (пер. с англ. Controllability (Yv)) выражает потенциальное доминирование контролирующими точками, которые попали в область изовиста данной точки [6]. Показатель увеличивается по мере того, как изовист охватывает области пространства, которые генерируют более крупные изовисты, чем он сам (рис. 12).

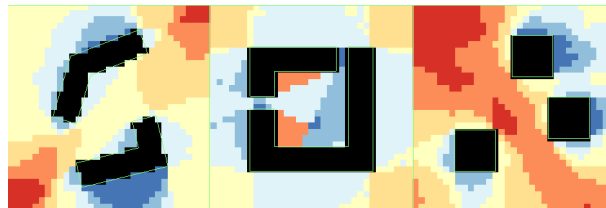


Рис. 12. Схема управляемости, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее высокий показатель регуляции потока, а синий – минимальное, показывающее низкий показатель регуляции потока

Результат: при рассмотрении данной схемы интересно заметить, что периметральная (закрытая) и локальная (открытая) застройки максимально регулируют потоковость [15] на своей территории, в то время как линейная (полузакрытая) совсем не справляется с этой задачей.

Метод 5. Анализ угловых отношений. Результат расчета предоставляет следующие параметры:

1. *Угловая средняя глубина* (пер. с англ. Angular Mean Depth) – сумма кратчайших угловых путей к сумме всех угловых пересечений в системе. Depthmap определяет параметр как сумму кратчайших угловых путей применительно к сумме сегментов, встречающихся на путях от корневого (исходного) сегмента ко всем остальным (рис. 13) [16].

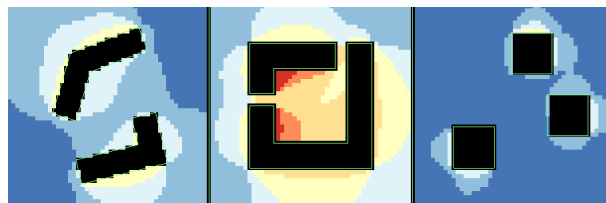


Рис. 13. Схема средней угловой глубины, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее кратчайшие угловые пути, а синий – минимальное, показывающее дальние угловые пути

2. Суммарная угловая глубина (пер. с англ. Angular Total Depth) – сумма кратчайших угловых путей в системе (рис. 14) [16].

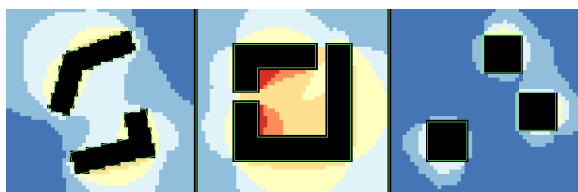


Рис. 14. Схема суммарной угловой глубины, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее сумму кратчайших угловых путей, а синий – минимальное, показывающее сумму дальних угловых путей

Результат: данные схемы подтверждают расчеты, полученные выше, и тем самым могут использоваться как данные принципиальной модели, на основании которых в последующем будут проводиться подобные расчеты по застройке территории г. Новосибирска.

Метод 6. Анализ сквозной видимости. В результате данного анализа возможно получить показатель сквозной видимости, используемый как способ определения мест, которые пересекаются чаще и, таким образом, могут считаться важными для движения [17]. Сквозная видимость может быть определена как количество линий видимости, которые проходят через локацию, т. е. число пересечений ячейки сетки линиями, проведенными между центрами всех других межвидимых ячеек (рис. 15). Эта метрика может использоваться для определения мест, наиболее вероятных для прохождения, учитывая, что они «на пути» из одной позиции в другую (рис. 16).

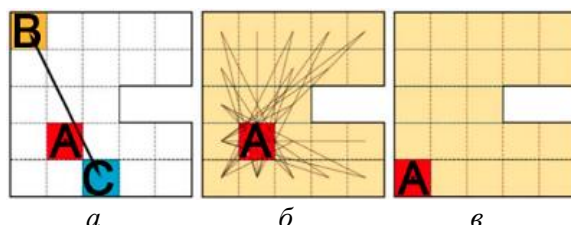


Рис. 15. Схема работы сквозной видимости:

а – линии, проведенные из видимых ячеек (например, В – С), увеличивают сквозное зрение для ячейки А; *б* – ячейка А имеет значение сквозного видения 56; *в* – ячейка А имеет значение сквозного зрения 0

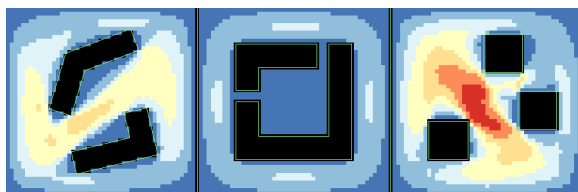


Рис. 16. Схема сквозной видимости, где красный цвет выражает максимальное значение, показывающее места для движения с высоким приоритетом, а синий – минимальное, показывающее места для движения с низким приоритетом

Результат: анализируя полученную из расчета схему сквозной видимости, можно проследить, что линейная (полузакрытая) и локальная (открытая) застройки образуют пешеходные потоки, которые впоследствии становятся важными для движения не только жителей данных домов, но и всего города, в то время как периметральная (закрытая) застройка их и вовсе не образует. Этот факт можно рассматривать как отрицательный аспект для пешеходов с точки зрения проходимости и экономии времени на передвижение, в то же время можно рассматривать как и положительный аспект для учреждений военных, медицинских, образовательных и дошкольных, т. к. через них не будут ходить посторонние просто потому, что это неудобный маршрут, и в основном их будут обходить.

Заключение

Выявлено, что актуальная теория морфологии города, работая с такими элементами городской среды, как здания, участки и улицы, не дает ответов на вопрос, почему и как протекает социальная активность внутри той или иной морфологической структуры, а скорее демонстрирует последствия таких процессов в конкретный момент времени. Чтобы объяснить замеченную взаимосвязь между городской структурой и формами пространств, внутри которых протекает активность, была создана конфигурационная концепция представления этих структур.

Возникновение теории пространственного синтаксиса дает возможность и инструменты говорить о структурах не только как о форме, но и как о конфигурации, позволяя получить новые физические и топологические параметры и величины, что значительно расширяет инструментарий городских исследователей.

Отмечено, что отечественные ученые не предлагают подобного конфигурационного подхода, большая часть исследователей, которые рассматривали бы пешеходные пространства, представляют пешеходное движение как поток из точки А в точку Б, в то время как существуют суждения, что феномен движения – более сложный комплекс социальных активностей, где имеет место быть не только целеполагание, но и специфический выбор.

В исследовании выявлены принципы пространственной теории:

1. Пространство непрерывно.
2. Конфигурация имеет прямое влияние на распределение аттракторов (пешеходов), аттракторы имеют косвенное влияние на конфигурацию.
3. Влияние конфигурации на аттракторы и функции первично, а обратное влияние вторично.
4. Существует процесс «метрической интеграции», что создает экономию движения в локальной сети.
5. Принцип эффективной модели представления: сегментная карта – для крупных масштабов пространств, пространственная карта – для малых масштабов.
6. Принцип проверки корреляции с действительностью посредством натуральных обследований по разработанной методологии.
7. Принцип комплексной интерпретации данных.

В исследовании представлены основные виды анализа пространственной теории на базе трех типовых принципиальных застроек г. Новосибирска: линейной (полузакрытой), периметральной (закрытой), локальной (открытой).

В ходе работы выявлены основные параметры, которые необходимо использовать в разработке метода классификации пространств на основе свойств изовистов: *пространственная связность, наименьший луч, наибольший луч, изменчивость*. В последующей работе необходимо практически определить пороговые значения для более точной интерпретации данных.

В ходе теоретического исследования также определены ограничения конфигурационной модели, с которой возможно работать на данном этапе развития программного обеспечения: 1) невозможность учета рельефа; 2) случайность агентного моделирования; 3) невозможность учитывать выбор агентов (пешеходов), основанный не на пространственных показателях; 4) проблема больших пространств и проблема коридоров; 5) недостаточная функциональность базового программного обеспечения и необходимость совместного использования с другими программами.

В рамках научного исследования сформирована гипотеза для будущих исследований, которая заключается в практической пользе аналитического аппарата пространственной теории в определении метрической, топологической или интеграционной целостности локально-целостных градостроительных образований, перечисленных в работе А.Е. Гашенко [18].

На базе полученных исследований планируется расширить зону изучения до микрорайонов Новосибирска и просчитывать оптимальные варианты застройки относительно пешеходных потоков, безопасных просматриваемых пространств и с учетом доступности радиусов действий социально значимых объектов на территориях застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Heineberg H. German geographical urban morphology in an international and interdisciplinary framework // *Urban Morphology*. 2007. № 11 (1). P. 5–24.
2. Siksnia A. The study of urban form in Australia // *Urban Morphology*. 2006. № 10 (2). P. 89–100.
3. Gilliland J. The study of urban form in Canada // *Urban Morphology*. 2006. № 10 (1). P. 51–66.
4. Larkham J.P. The study of urban form in Great Britain // *Urban Morphology*. 2006. № 10 (2). P. 117–141.
5. Hiller B. *Space is the machine: A configurational theory of architecture*. London : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 370 p.
6. Turner A. Depthmap: a program to perform visibility graph analysis // *Proceedings of the 3rd International Symposium on Space Syntax*, Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia, 2001. 12 p.
7. Turner A. *Depthmap. A Researcher's Handbook*. London : Bartlett, School of Graduate Studies, 2004. 50 p.
8. Benedikt M. To Take Hold of Space: Isovists and Isovist Fields // *Environment and Planning B*. V. 6. 1979. P. 47–65.
9. Al_Sayed K., Hillier B., Penn A., Turner A. *Space syntax methodology // A teaching guide for the MRes.MSc Space Syntax course (version 5)*, Bartlett School of Architecture. UCL, 2018. 117 p.
10. McElhinney S. *Isovist_2.2: a basic user guide*. V 1.4. 2018. URL: https://isovists.org/user_guide/
11. Сазанов А.А. *Четырехмерный мир Минковского*. Москва : Наука, 1988. 224 с.

12. De Arruda Campos M.B., Fong P.S.P. Bending the axial line: Smoothly continuous road centre-line segments as a basis for road network analysis // *Proceedings of the 4th International Symposium on Space Syntax*. UCL. London. UK, 2003. P. 35.1–35.10.
13. Teklenburg J.A.F., Timmermans H.J.P., van Wageningen A.F. Space syntax: Standardised integration measures and some simulations // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 1993. № 20 (3). P. 347–357.
14. Hillier B. *The Social Logic of Space*. London : Cambridge University Press, 2008. 296 p.
15. Dalton R., Dalton N. OmniVista: an application for isovist field and path analysis // *3rd International Space Syntax Symposium*. Atlanta, Georgia, 2001. 56 p.
16. Turner A. Angular Analysis // *Proceedings of the 3rd International Symposium of Space Syntax*. 2001. P.1–13.
17. Turner A. To Move through Space: Lines of Vision and Movement // *Proceedings. 6th International Space Syntax Symposium*. 2007. 12 p.
18. Гашенко А.Е. Формирование базовых градостроительных образований в структуре г. Новосибирска : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры : 18.00.01 / Гашенко Антон Евгеньевич. Новосибирск, 2018. 257 с.

REFERENCES

1. Heineberg H. German geographical urban morphology in an international and interdisciplinary framework. *Urban Morphology*. 2007. No. 11 (1). Pp. 5–24.
2. Siksnas A. The study of urban form in Australia. *Urban Morphology*. 2006. No. 10 (2). Pp. 89–100.
3. Gilliland J. The study of urban form in Canada. *Urban Morphology*. 2006. No. 10 (1). Pp. 51–66.
4. Larkham J.P. The study of urban form in Great Britain. *Urban Morphology*. 2006. No. 10 (2). Pp. 117–141.
5. Hillier B. *Space is the machine: A configurational theory of architecture*. London: CreateSpace Independent Publishing Platform. 2015. 370 p.
6. Turner A. Depthmap: A program to perform visibility graph analysis. In: *Proc. 3rd Int. Symp. on Space Syntax, Georgia Institute of Technology*. Atlanta, Georgia, 2001. 12 p.
7. Turner A. Depthmap 4. A researcher's handbook. London: Bartlett, School of Graduate Studies. 2004. 50 p.
8. Benedikt M. To take hold of space: Isovists and isovist fields. *Environment and Planning B*. 1979. V. 6. Pp. 47–65.
9. Al-Sayed K., Hillier B., Penn A., Turner A. Space syntax methodology. A teaching guide for the MRes.MSc Space Syntax course (version 5). Bartlett School of Architecture. UCL. 2018. 117 p.
10. McElhinney S. Isovist_2.2: A basic user guide. 2018. V. 1.4. Available: https://isovists.org/user_guide/
11. Sazanov A.A. Chetyrekhmernyi mir Minkovskogo [Minkowski's four-dimensional world]. Moscow: Nauka, 1988. 224 p. (rus)
12. De Arruda Campos M.B., Fong P.S.P. Bending the axial line: Smoothly continuous road centre-line segments as a basis for road network analysis. In: *Proc. 4th Int. Symp. on Space Syntax*. UCL. London, UK. 2003. Pp. 35.1–35.10.
13. Teklenburg J.A.F., Timmermans H.J.P., van Wageningen A.F. Space syntax: Standardised integration measures and some simulations. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 1993. No. 20 (3). Pp. 347–357.
14. Hillier B. *The social logic of space*. London: Cambridge University Press, 2008. 296 p.
15. Dalton R., Dalton N. OmniVista: An application for isovist field and path analysis. In: *Proc. 3rd Int. Space Syntax Symposium*. Atlanta, Georgia, 2001. 56 p.
16. Turner A. Angular analysis . In: *Proc. 3rd Int. Space Syntax Symposium*. 2001. Pp. 1–13.
17. Turner A. To move through space: Lines of vision and movement. In: *Proc. 6th Int. Space Syntax Symposium*. 2007. 12 p.
18. Gashenko A.E. Formirovaniye bazovykh gradostroitel'nykh obrazovaniy v strukture g. Novosibirsk [Basic town-planning formations in Novosibirsk. PhD Thesis]. Novosibirsk, 2018. 257 p. (rus)

Сведения об авторах

Бегей Елизавета Дмитриевна, магистрант, Новосибирский архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, lizakx@mail.ru

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

Authors Details

Elizaveta D. Begey, Graduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, lizakx@mail.ru

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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 69.036 + 699.865

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-72-88

*С.Н. ОВСЯННИКОВ, В.Н. ОКОЛИЧНЫЙ, А.Н. ОВСЯННИКОВ,
О.В. ЛЕЛЮГА, А.С. САМОХВАЛОВ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

МНОГОСЛОЙНОЕ ПЛЕНОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ*

Аннотация. В статье выполнен обзор большепролетных конструкций и сооружений с покрытиями из пленки этилен-тетрафторэтилена. Рассматриваются характеристики этилен-тетрафторэтилена и возможности его применения. Представлены результаты натурных теплотехнических испытаний отдельных ячеек покрытия в виде пленкопакетов и сегмента ограждающей конструкции с натурными размерами и с различным числом слоев в пленкопакетах, а также результаты светотехнических испытаний многослойных пленочных покрытий. Результаты исследования многослойных покрытий из пленки этилен-тетрафторэтилена показали возможность достижения высоких теплозащитных и светотехнических характеристик ограждающих конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях сурового климата.

Ключевые слова: этилен-тетрафторэтилен, многослойные пленочные покрытия, энергосбережение, тепловая защита, светотехнические характеристики

Для цитирования: Овсянников С.Н., Околичный В.Н., Овсянников А.Н., Лелюга О.В., Самохвалов А.С. Многослойное пленочное покрытие с высоким уровнем тепловой защиты // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 72–88.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-72-88

* Исследование выполнено по заказу ФГУП «ГНПП «КРОНА» по теме «Поиск, исследование и анализ решений несущих, ограждающих конструкций и оснований для создания большепролетных климатических искусственных укрытий для условий районов Крайнего Севера и вечной мерзлоты» и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту FEMN-2020-0003.

S.N. OVSYANNIKOV, V.N. OKOLICHNYI, A.N. OVSYANNIKOV,
O.V. LELYUGA, A.S. SAMOKHVALOV,
Tomsk State University of Architecture and Building

MULTILAYERED COATINGS WITH HIGH THERMAL PROTECTION

Abstract. The paper reviews the long span structure with the ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) coating. The ETFE coating properties and possibilities of its application are considered herein. The paper presents results of natural heat engineering tests of separate cells of the coating in the form of a foil package and enclosing structure segment of natural size with various number of ETFE layers and lighting tests of multilayered coatings. It is shown that high thermal protection and illuminating parameters can be gained for ETFE-coated enclosing structures for the operation in arctic conditions.

Keywords: ethylene-tetrafluoroethylene, multilayered coating, energy saving, thermal protection, light transmission

For citation: Ovsyannikov S.N., Okolichnyi V.N., Ovsyannikov A.N., Lelyuga O.V., Samokhvalov A.S. Mnogosloinoe plenochnoe pokrytie s vysokim уровнем teplovoi zashchity [Multilayered coatings with high thermal protection]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 72–88.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-72-88

Значительную часть России занимают северные и удаленные территории, для которых существует необходимость создания сверхлегких большепролетных конструктивных систем со светопрозрачными ограждающими конструкциями, обладающими высокой теплозащитой. В связи с активным освоением Арктики [1] формирование комфортной среды жизнедеятельности на этой территории приобретает особую актуальность для России.

Сухопутная часть Арктики Российской Федерации с экстремальными климатическими условиями занимает территорию около 2,2 млн кв. км. Климат здесь крайне суров, имеет расчетные температуры наружного воздуха до -58°C , в Якутии – до -63°C , а продолжительность отопительного периода длится до 340 сут. Активное освоение Арктической зоны обусловлено огромными запасами углеводородов, цветных и благородных металлов, других полезных ископаемых. На арктическом побережье России расположены порты, обслуживающие Северный морской путь, который почти вдвое короче, чем другие морские пути из Европы на Дальний Восток и в Юго-Восточную Азию.

В Арктической зоне востребованы большепролетные, в том числе купольные сооружения с покрытием, обладающим достаточно высоким коэффициентом светопропускания и значительным сопротивлением теплопередаче. В закрытом оболочкой пространстве могут быть размещены вахтовые поселки с жилыми и общественными зданиями, сформированы производственные площадки с ангарами для обслуживания и хранения техники, складскими помещениями и др. Отдельные сооружения с более высокими температурами могут быть использованы для сельскохозяйственного назначения. Для формирования территории, защищенной от суровой внешней среды, наилучшим образом под-

ходят легкие большепролетные конструкции с покрытием из пленки этилен-тетрафторэтилена (ЭТФЭ) [2].

Отечественный и зарубежный опыт современного строительства большепролетных сооружений со светопрозрачными покрытиями показывает, что большинство современных покрытий выполнено из пневматических подушек в один или несколько слоев пленки ЭТФЭ. Десятки объектов построены за рубежом (рис. 1), ряд объектов построены и успешно эксплуатируются в России: в Сочи, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Тюмени (рис. 2).

*а**б**в**г**д**е*

Рис. 1. Покрытия сооружений из пленки ETFE (ЭТФЭ):

а – ботанический сад «Эдем», Великобритания; *б* – национальный плавательный комплекс, Китай; *в* – Флора Экспо, Китай; *г* – зоопарк Leipzig Zoo, Германия; *д* – здание «Хан-Шатыр», Казахстан; *е* – арочный каркас для натяжения пленок

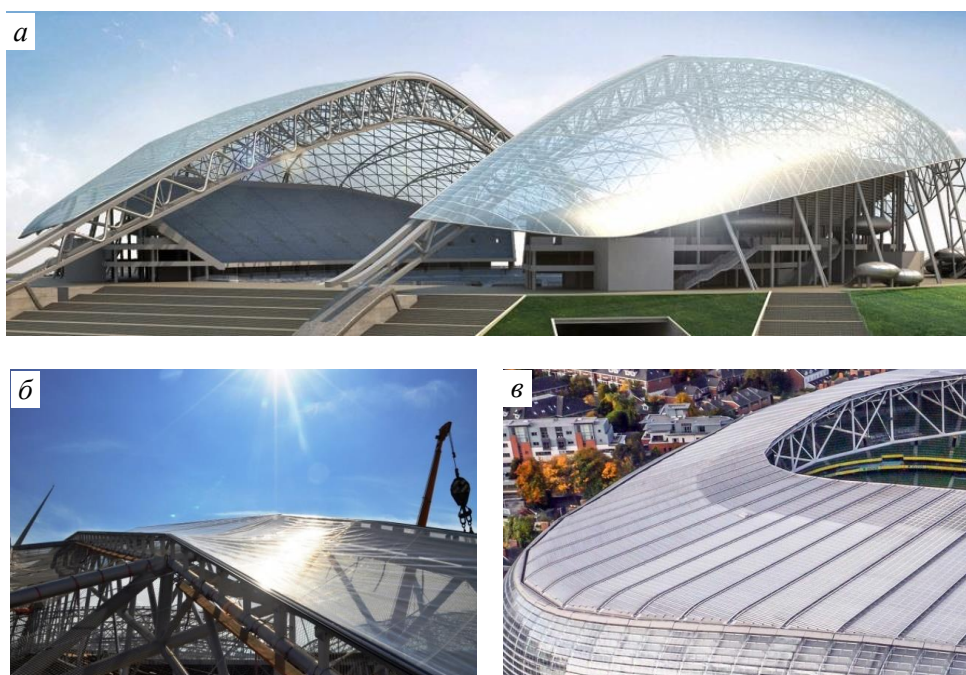


Рис. 2. Покрытия сооружений из пленки ЭТФЭ в России:

а – олимпийский стадион «Фишт», Сочи; *б* – стадион «Газпром Арена», Санкт-Петербург; *в* – светопрозрачное покрытие стадиона «Казань-Арена», Екатеринбург

Пленка ЭТФЭ обладает уникальными прочностными и физико-техническими свойствами, имеет высокие характеристики светопропускания, устойчива к солнечной радиации. Исследованиям свойств пленки ЭТФЭ и ее применению посвящен целый ряд отечественных и зарубежных работ [3–24]. Вместе с тем практика показала, что пленка ЭТФЭ использовалась только в пневматических конструкциях, требующих постоянной подкачки воздуха, а сами подушки изготавливались и исследовались с числом воздушных промежутков не более трех. Приведенное сопротивление теплопередаче (R_0) таких подушек по глади, т. е. без учета теплопроводных включений каркаса ограждения, имеет невысокие значения. Согласно своду правил (СП)¹, прил. Н, для подушки с 2 рядами пленки $R_0 = 0,508 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, для подушки с 3 рядами пленки $R_0 = 0,587 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, для подушки с 4 рядами пленки $R_0 = 0,666 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Для пневматических пленочных конструкций достижение указанных значений маловероятно, поскольку все воздушные промежутки (камеры) не замкнуты, а связаны между собой для обеспечения равномерной подачи воздуха от компрессора. Кроме этого, узлы крепления подушек непосредственно на металлический каркас создают высокие локальные трансмиссионные теплопотери.

Вместе с тем для многослойных пленочных конструкций с замкнутыми воздушными промежутками достижимым значением является сопротивление

¹ СП 363.1325800.2017. Покрытия светопрозрачные и фонари зданий и сооружений. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2017. 31 с.

теплопередаче не менее $1,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$, поэтому было принято решение разработать и испытать конструкцию сегмента оболочки с ячейками из многокамерных пленкопакетов с высокими значениями сопротивления теплопередаче.

Для этой цели в Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) по заказу ФГУП «ГНПП «Крона» разработаны конструкции сегмента покрытия с ячейками из многокамерных пленкопакетов с использованием пленки ЭТФЭ. Проведены лабораторные теплотехнические и светотехнические испытания пленки ЭТФЭ, многокамерных пленкопакетов и треугольного сегмента в натурную величину в климатических камерах ТГАСУ.

Программа теплотехнических испытаний включала в себя измерения тепловых потоков и температур, а затем и определение приведенного сопротивления теплопередаче пленкопакетов, выполненных из пленки ЭТФЭ толщиной 100 мкм, с количеством воздушных промежутков в 11 мм от 1 до 12. Некоторые пленкопакеты изготавливались с дополнительными слоями пленки из лавсана и нанесенным на него теплоотражающим покрытием (ТОП). В световых камерах лаборатории строительной физики ТГАСУ конструкции пленкопакетов исследовались для определения коэффициента светопропускания.

Теплотехнические испытания ячеек покрытия – пленкопакетов

Треугольные ячейки – пленкопакеты с конструктивными размерами 1260 мм являются составной частью сегмента (фрагмента) ограждающего купольного покрытия, который выполнен треугольной формы со стороной 3,0 м и в котором установлены четыре ячейки из пленкопакетов. Для изготовления пленкопакетов с пленками ЭТФЭ 100 мкм в эксперименте использовались деревянные клееные рейки сечением 19×11 мм с нервюрами посередине сечением 1×1 мм (рис. 3) и для пленкопакетов с пленкой 250 мкм – стеклопластиковые коробчатые профили 25 мм.



Рис. 3. Ячейки пленкопакетов: а – 4-камерный; б – 10-камерный

Теплотехнические испытания отдельных пленкопакетов и их набора в комбинации с ЭТФЭ и лавсановой пленкой с ТОП производились в холодильной камере лаборатории строительной физики по ГОСТ 25380–2014² и ГОСТ 26254–84³ (рис. 4).

² ГОСТ 25380–2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Москва: Стандартинформ. 2018. 16 с.

³ ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. М.: Стандартинформ. 1985. 27 с.

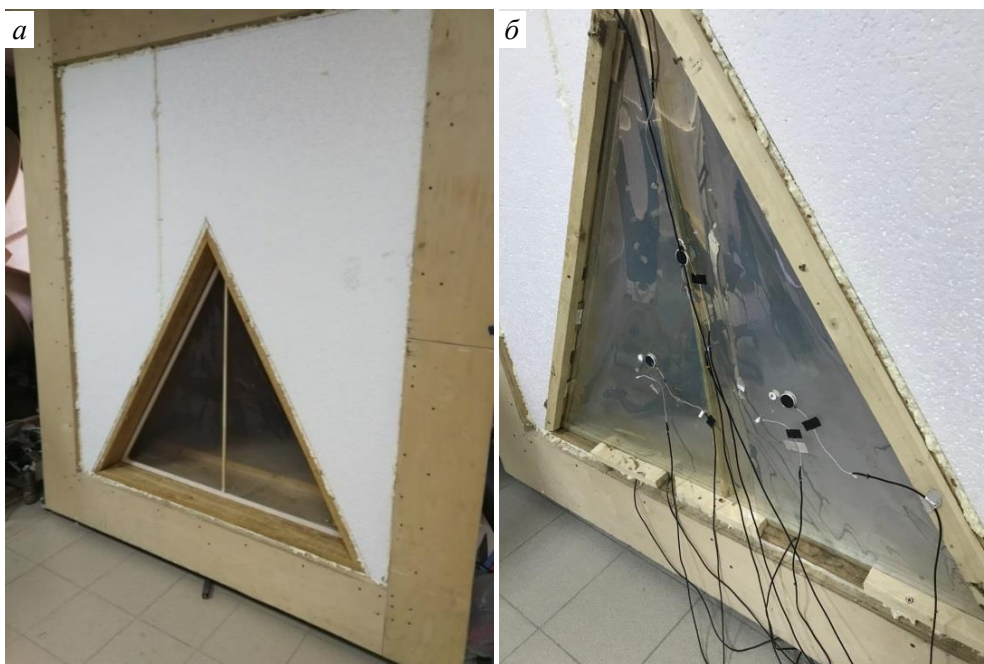


Рис. 4. Теплотехнические испытания отдельных ячеек-пленкопакетов в холодильной камере:

а – ячейка с пленкой ЭТФЭ; *б* – ячейка-пленкопакет с пленкой ЭТФЭ и лавсановая пленка с ТОП

Испытания позволили определить приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ячеек сегмента с различным количеством слоев пленок и воздушных промежутков, а также оценить влияние теплоотражающих покрытий. Результаты испытаний показали, что однокамерный пленкопакет с воздушным промежутком 11 мм дает приведенное сопротивление теплопередаче $0,38 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ с учетом термического сопротивления слоя, сопротивления теплоотдачи и тепловосприятия соответственно наружной и внутренней поверхностей. Каждый дополнительный воздушный промежуток добавляет дополнительное термическое сопротивление пленкопакета в среднем $0,15 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Десятикамерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ) дает сопротивление теплопередаче $1,70 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Исследование теплозащиты пленкопакетов с ТОП производилось с использованием лавсановой пленки с нанесенным теплоотражающим покрытием. Двухкамерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и пленка с ТОП) показал высокое сопротивление теплопередаче $1,07 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, что вдвое выше, чем пленкопакет без ТОП. Трехкамерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП) показал сопротивление теплопередаче $1,35 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, что вдвое выше, чем трехкамерный пленкопакет без ТОП ($0,69 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$). Одиннадцатикамерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 1 пленка с ТОП) показал сопротивление теплопередаче $1,96 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, а двенадцатикамерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП) показал еще более высокое сопротивление теплопередаче $2,38 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Последний результат сопоставим с сопротивлением теплопередаче

стенowych панелей современных крупнопанельных зданий, состоящих из 2 слоев керамзитобетона общей толщиной 200 мм и слоя пенополистирола 200 мм, для которых величина приведенного сопротивления теплопередаче с учетом влияния гибких и жестких связей составляет около $2,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Результаты измерения приведенного сопротивления теплопередаче пленкопакетов представлены в табл. 1 и на рис. 5, 6.

Таблица 1

**Результаты измерения приведенного сопротивления
теплопередаче пленкопакетов**

№ п/п	Наименование пленкопакета	Приведенное сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
1	1-камерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ)	0,38
2	2-камерный пленкопакет (3 пленки ЭТФЭ)	0,53
3	3-камерный пленкопакет (4 пленки ЭТФЭ)	0,69
4	4-камерный пленкопакет (5 пленок ЭТФЭ)	0,84
5	5-камерный пленкопакет (6 пленок ЭТФЭ)	0,95
6	6-камерный пленкопакет (7 пленок ЭТФЭ)	1,11
7	7-камерный пленкопакет (8 пленок ЭТФЭ)	1,25
8	8-камерный пленкопакет (9 пленок ЭТФЭ)	1,40
9	9-камерный пленкопакет (10 пленок ЭТФЭ)	1,55
10	10-камерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ)	1,70
11	2-камерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и пленка с ТОП)	1,07
12	3-камерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП)	1,35
13	11-камерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 1 пленка с ТОП)	1,96
14	12-камерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП)	2,38

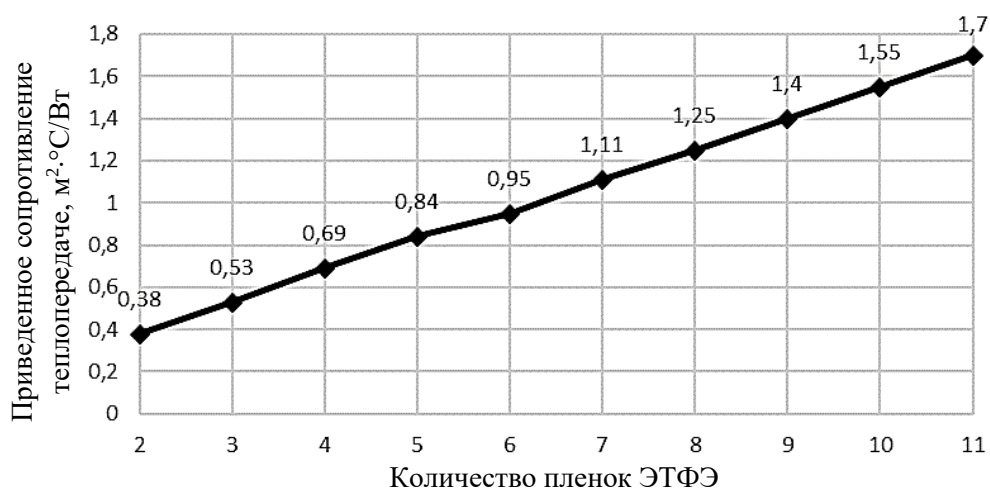


Рис. 5. График зависимости сопротивления теплопередаче от числа пленок ЭТФЭ в пленкопакете

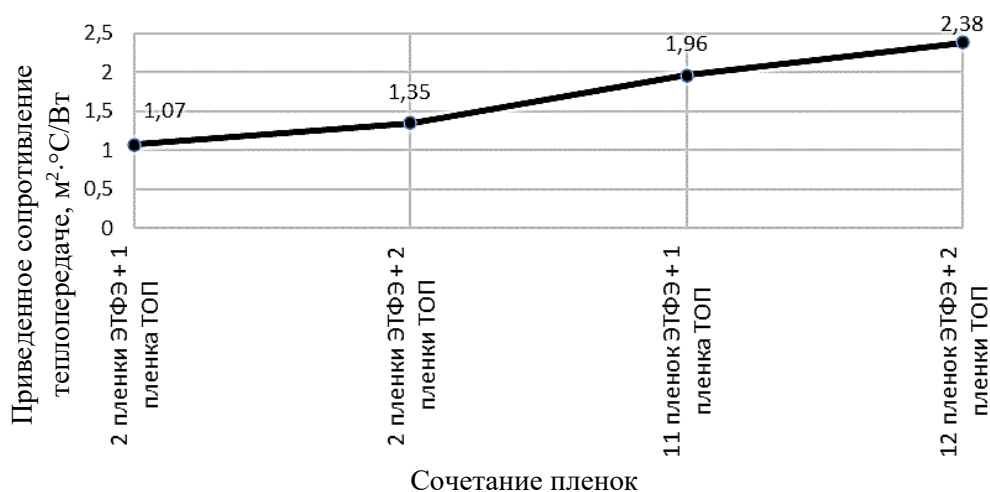


Рис. 6. График зависимости сопротивления теплопередаче от числа пленок ЭТФЭ и ТОП в пленкопакете

Результаты исследования теплозащитных свойств многокамерных пленкопакетов из ЭТФЭ показали техническую возможность получения сверхлегких светопрозрачных ограждающих конструкций. Как можем видеть из табл. 1, многослойные пленочные кассеты с ТОП имеют перспективу заменить традиционные теплоизолирующие материалы и в непрозрачных ограждающих конструкциях, что позволит получить сверхлегкие ограждения, пригодные для транспортировки, монтажа и эксплуатации на удаленных арктических территориях.

Светотехнические испытания пленки ЭТФЭ и многокамерных пленкопакетов

Светотехнические испытания пленкопакетов выполнены в светомерных камерах ТГАСУ (рис. 7) по ГОСТ 26602.4–2012⁴ для ряда пленкопакетов, различных по числу и наличию теплоотражающих покрытий (рис. 8).



Рис. 7. Общий вид светомерных камер

В результате экспериментов выявлено, что коэффициент светопропускания одной пленки ЭТФЭ 100 мкм вместе с дистанционной рамкой составил в среднем $\tau_0 = 0,873$; одной пленки ЭТФЭ 250 мкм с дистанционной рамкой $\tau_0 = 0,871$. С учетом того что коэффициент светопропускания пустой рамки $\tau_2 = 0,933$, коэффициент светопропускания по материалу ЭТФЭ составил для пленки 100 мкм $\tau_1 = 0,94$ и для пленки 250 мкм $\tau_1 = 0,93$. Эти результаты достаточно близко соответствуют характеристикам, заявленным производителем.

⁴ ГОСТ 26602.4–2012. Блоки оконные и дверные. Метод определения общего коэффициента пропускания света. Москва: Стандартинформ. 2014. 15 с.

лем ($\tau_1 = 0,96$) без указания толщины материала, что, безусловно, влияет на результат. Результаты измерения светотехнических характеристик пленкопакетов с различным количеством пленок и ТОП представлены в табл. 2 и на рис. 9.



Рис. 8. Монтаж пленкопакетов в светомерных камерах

Таблица 2

**Результаты светотехнических испытаний
многослойных пленочных пакетов**

№ п/п	Наименование конструкции образца	Общий коэффициент светопропускания по пленке τ_0	Коэффициент светопропускания по переплетам τ_2
1	Деревянная треугольная рамка без пленки	—	0,933
2	Одна рамка с 1 пленкой лавсановой в 1 слой с теплоотражающим покрытием	0,397	—
3	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 100 мкм в 1 слой	0,866	—
4	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 100 мкм в 1 слой	0,868	—
5	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 100 мкм в 1 слой	0,884	—
6	Две рамки с 2 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,821	—
7	Три рамки с 3 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,734	—

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование конструкции образца	Общий коэффициент светопропускания по пленке τ_0	Коэффициент светопропускания по переплетам τ_2
8	Четыре рамки с 4 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,667	—
9	Пять рамок с 5 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,640	—
10	Шесть рамок с 6 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,582	—
11	Семь рамок с 7 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,531	—
12	Восемь рамок с 8 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,509	—
13	Девять рамок с 9 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,459	—
14	Десять рамок с 10 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,427	—
15	Одиннадцать рамок с 11 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,400	—
16	Двенадцать рамок с 12 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,354	—
17	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 250 мкм	0,871	—
18	Две рамки с 2 пленками ЭТФЭ 250 мкм	0,750	—

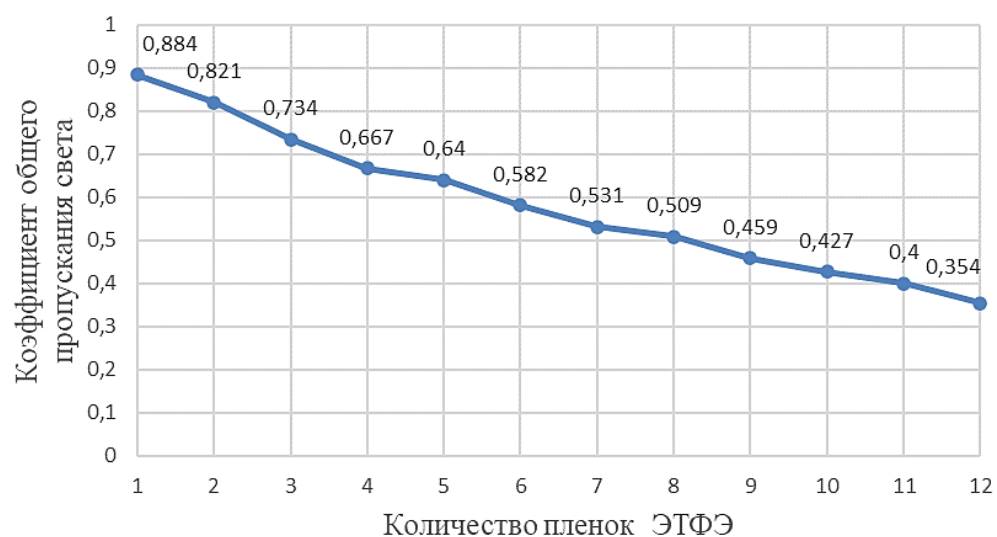


Рис. 9. График зависимости общего коэффициента светопропускания пленкопакетов от количества пленок толщиной 100 мкм

Из графика на рис. 9 и табл. 2 можем видеть, что каждый дополнительный слой ЭТФЭ толщиной 100 мкм вместе с рамкой снижает коэффициент светопропускания в среднем на 0,044. Следует также отметить, что 11-камерный пленкопакет с 12 пленками ЭТФЭ дает общий коэффициент светопропускания 0,354.

Вместе с тем измерения коэффициента светопропускания одной лавсановой пленки с теплоотражающим покрытием на рамке показали весьма низкий коэффициент общего светопропускания $\tau_0 = 0,397$. Данный результат указывает на необходимость разработки технологии нанесения теплоотражающих покрытий на пленки ЭТФЭ магнетронным способом, поиска оптимальных решений пленкопакетов и изучения светотехнических характеристик пленок ЭТФЭ и пленкопакетов с ТОП. Светотехнические исследования показали целесообразность дополнительных светотехнических испытаний готовых опытных образцов многослойных пленочных кассет и внесения этих сведений как справочных в нормативную литературу для проектирования светопрозрачных конструкций с многокамерными пленкопакетами из ЭТФЭ.

Исследование сопротивления теплопередаче треугольного сегмента прототипа светопрозрачной ограждающей конструкции

Теплотехнические исследования и определение приведенного сопротивления теплопередаче треугольного сегмента оболочки проведены по методике ГОСТ 25380–2014⁵ и ГОСТ 26254–84⁶ в климатических камерах ТГАСУ, имеющих холодную камеру с объемом 33,53 м³ и теплую камеру с объемом 30,04 м³, между которыми устроен проем 2,8×2,5 м. Холодильный агрегат мощностью 3,5 кВт способен в автоматическом режиме поддерживать температуры до –45 °С. В холодной камере для эксперимента построен деревянный каркас для монтажа прототипа сегмента и смонтирована теплоизоляция контура из пенополистирола толщиной 200 мм (рис. 10).

Сегмент выполнен из 3 несущих стеклопластиковых профилей 100×100 мм, формирующих треугольный сегмент с внешними размерами 3,0 м. В него встроены тавровые профили с высотой стенки 190 мм и шириной полки 100 мм, образующие четыре ячейки для монтажа пленкопакетов.

В ячейки вставлены разные по числу слоев пленкопакеты:

- 10-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм и 9 пленками ЭТФЭ 100 мкм;
- 10-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм, 8 пленками ЭТФЭ 100 мкм и 1 лавсановой пленкой с ТОП;
- 7-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм, 5 пленками ЭТФЭ 100 мкм и 1 лавсановой пленкой с ТОП;
- 4-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм и 3 пленками ЭТФЭ 100 мкм.

⁵ ГОСТ 25380–2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Москва: Стандартинформ. 2018. 16 с.

⁶ ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Москва: Стандартинформ. 1985. 27 с.



Рис. 10. Сегмент оболочки со стороны холодной камеры

Набор различных пленкопакетов позволил получить экспериментальные данные для различных конструктивных решений оболочки. Плотности тепловых потоков и температуры на пленкопакетах и каркасе сегмента измерялись многоканальным измерительным прибором ИТП-МГ 4.03-100 «Поток» (рис. 11).

Измерения сопротивления теплопередаче показали высокие значения по пленкопакетам, но очень низкие значения сопротивления теплопередаче по стеклопластиковым профилям в виде полрой квадратной трубы 100×100 мм, усиленной тавром 190×100 мм. После заполнения стеклопластиковых профилей пенополиуретаном приведенное сопротивление теплопередаче сегмента оболочки существенно возросло (табл. 3).



Рис. 11. Сегмент оболочки со стороны теплой камеры с датчиками теплового потока

Таблица 3

**Приведенное сопротивление теплопередаче сегмента купола
с различными ячейками**

№ п/п	Конструкция ячейки сегмента	Приведенное сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
1	10-камерный пленкопакет без ТОП	1,359
2	10-камерный пленкопакет с ТОП на внутренней пленке	1,612
3	7-камерный пленкопакет с ТОП на внутренней пленке	1,300
4	4-камерный пленкопакет без ТОП	0,860

Теплотехнические испытания натурного фрагмента покрытия указали на необходимость совершенствования конструкции переплетов, которые были приняты для эксперимента из имевшихся на рынке профилей. Численные расчеты авторов с использованием программы «Темрег-3D» показывают, что в этом случае теплозащита по профилям может быть не ниже, чем по пленкопакетам.

Выводы

Результаты исследования многослойных пленочных покрытий из пленки ЭТФЭ продемонстрировали возможность достижения высоких теплозащитных и светотехнических показателей ограждающих конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях сурового климата. Локализация производства пленки ЭТФЭ в России и существенное снижение ее стоимости позволят в перспективе проектировать арктические вахтовые поселки, различного типа укрытия, оранжереи, тепличные комплексы и сооружения гражданского назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года*. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645.
2. Овсянников С.Н. Концепция создания комфортной среды жизнедеятельности в экстремальном климате Арктики // ИГН как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : сб. материалов XII Международной научно-практической конференции. Томск, 2022. Ч. 1. С. 17–29.
3. *Новое в технологии соединений фтора* : пер. с японск. / под ред. Н. Исикавы. Москва : Мир, 1984. 592 с.
4. Паинин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Ленинград : Химия, 1978. 232 с.
5. Houtman R., Llorens J.I. Materials used for architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. P. 101–120.
6. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria // *Constr. Build. Mater.* 2001. 15 (7). P. 323–327.
7. Chilton J. Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture // *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.* 2013. 166 (6). P. 343–357.
8. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. 2015. P. 203–219.
9. Robinson L.A. Structural Opportunities of ETFE (Ethylene Tetra Fluoro Ethylene). Massachusetts Institute of Technology, 2005. P. 66.
10. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior // *Construction and Building Materials*. 2017. 131. P. 411–422.
11. Chen W. Design of Membrane Structure Engineering // China Building Industry Press. 2010.
12. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: testing and modelling // *Constr. Build. Mater.* 2014. 60. P. 63–72.
13. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil // *Mech. Time-Depend.* 2015. Mater. 19 (1). P. 21–34.
14. Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S. Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures // *Spat. Struct.* 2010. 16 (4). P. 38–43.
15. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading // *J. Build. Mater.* 2015. 18 (1). P. 69–75.
16. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils // *Constr. Build. Mater.* 2014. 63 (1). P. 311–319.
17. Schmid G. ETFE cushions and their thermal and climatic behavior // *Tensinet Symposium*, Milan, Italy. 2007. P. 115–125.
18. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPV/T ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system // *Energy Build.* 2014. 69 (1). P. 394–406.
19. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter // *J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)*. 2014. 48 (10). P. 1816–1821.

20. Zanelli A., Beccarelli P., Monticelli C., Maffei R., Ibrahim H.M. Technical and manufacturing aspects in order to create a smart façade system with OPV integrated into ETFE foils // International Symposia IASS-APCS. Seoul, Korea, 2012.
21. Цеентмайер С. Пленочные фторполимеры / пер. А.П. Сергеевкова // Полимерные материалы. 2018. № 8. С. 30–38.
22. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer 1. Crystal structure // Polymer. 1986. 27 (7). P. 999–1006.
23. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer. Transition from crystal phase to mesophase // Polymer. 1986. 27 (10). P. 1521–1528.
24. Kawabata M. Viscoplastic Properties of ETFE Film and Structural Behavior of Film Cushion // International Association for Shell and Spatial Structures Symposium, Venice, Italy, 2007.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2035 goda. Utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 26 oktyabrya 2020 g. N 645 [Development strategy of the Arctic Zone of the Russian Federation and national security for the period up to 2035. Approved by President's Decree N 645 of the Russian Federation, October 26, 2020]. (rus)
2. Ovsyannikov S.N. Kontseptsiya sozdaniya komfortnoi sredy zhiznedeyatel'nosti v ekstremal'nom klimate Arktiki [The concept of creating a comfortable living environment in arctic conditions]. In: IGN kak draivery sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya kachestva zhizni naseleniya: sb. materialov XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. 12th Int. Sci. Conf. 'IGN as Drivers of Socio-Economic Development of Territory and Life Quality Improvement'). Tomsk, 2022. Pt 1. Pp. 17–29. (rus)
3. Isikava N., (Ed.) Novoe v tekhnologii soedinenii ftora [New in fluorine compound technology]. Moscow: Mir, 1984. 592 p. (rus)
4. Pashnin Yu.A., Malkevich S.G., Dunaevskaya Ts.S. Ftoroplasty [Fluorine plastics]. Leningrad: Khimiya, 1978. 232 p. (rus)
5. Houtman R., Llorens J.I. Materials used for architectural fabric structures. In: Fabric Structures in Architecture. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. Pp. 101–120.
6. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria. *Construction and Building Materials*. 2001. V. 15. No. 7. Pp. 323–327.
7. Chilton J. Lightweight envelopes: Ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban Design and Planning*. 2013. V. 166. No. 6. Pp. 343–357.
8. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures. *Fabric Structures in Architecture*. 2015. Pp. 203–219.
9. Robinson L.A. Structural opportunities of ETFE (ethylene tetra fluoroethylene). *Massachusetts Institute of Technology*. 2005. P. 66.
10. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. *Construction and Building Materials*. 2017. V. 131. Pp. 411–422.
11. Chen W. Design of Membrane Structure Engineering. China Building Industry Press. 2010.
12. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: Testing and modelling. *Construction and Building Materials*. 2014. 60. P. 63–72.
13. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2015. V. 19 No. 1. Pp. 21–34.
14. Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S. Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures. *Spatial Structure*. 2010. V. 16. No. 4. Pp. 38–43.
15. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading. *Building Materials*. 2015. V. 18 No. 1. Pp. 69–75.

16. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils. *Construction and Building Materials*. 2014. V. 63. No. 1. Pp. 311–319.
17. Schmid G. ETFE cushions and their thermal and climatic behavior. In: Tensinet Symposium. Milan, Italy, 2007. Pp. 115–125.
18. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPV/T ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system. *Energy and Buildings*. 2014. V. 69. No. 1. Pp. 394–406.
19. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter. *The Journal of Zhejiang University*. 2014. V. 48. No. 10. Pp. 1816–1821.
20. Zanelli A., Beccarelli P., Monticelli C., Maffei R., Ibrahim H.M. Technical and manufacturing aspects in order to create a smart façade system with OPV integrated into ETFE foils. In: International Symposia IASS-APCS. Seoul. Korea, 2012.
21. Zehentmaier S. Plenochnye ftoropolimery [Film fluoropolymers]. *Polimernye materialy. Izdeliya, oborudovanie, tekhnologii*. 2018. No. 8. Pp. 30–38. (transl. from Germ.)
22. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer: 1: Crystal structure. *Polymer*. 1986. V. 27. No. 7. Pp. 999–1006.
23. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer: 2: Transition from crystal phase to mesophase. *Polymer*. 1986. V. 27. No. 10. Pp. 1521–1528.
24. Kawabata M. Viscoplastic properties of ETFE film and structural behavior of film cushion. In: International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Venice, Italy, 2007.

Сведения об авторах

Овсянников Сергей Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ovssn@tsuab.ru

Околичный Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, okolichnyi@mail.ru

Овсянников Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, anovs@mail.ru

Лелюга Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, olga.startseva27@gmail.com

Самохвалов Александр Сергеевич, инженер, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tomsk117@mail.ru

Authors Details

Sergei N. Ovsyannikov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ovssn@tsuab.ru

Vasilii N. Okolichnyi, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, okolichnyi@mail.ru

Aleksandr N. Ovsyannikov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, anovs@mail.ru

Ol'ga V. Lelyuga, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, olga.startseva27@gmail.com

Aleksandr S. Samokhvalov, Engineer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tomsk117@mail.ru

УДК 691.175+691-416

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-89-98

*С.Н. ОВСЯННИКОВ, В.Н. ОКОЛИЧНЫЙ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПЛЕНКИ ИЗ ЭТИЛЕН-ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА*

Аннотация. Проведены силовые испытания образцов пленки из этилен-тетрафторэтилена на разрывной машине INSTRON.

Установлен средний модуль упругости пленки в упругой стадии, который составил 35,8 МПа, при последующем нагружении происходит переход к упругопластичной и пластичной стадиям работы с понижением модуля упругости сначала до 1,78–2,71 МПа и затем до 0,06–0,086 МПа.

Силовые испытания мембраны из пленки из этилен-тетрафторэтилена толщиной 250 мкм на силовой треугольной раме при равномерно распределенной нагрузке 8,577 кПа не привели к разрыву мембраны ни при положительных (+15...+18 °С), ни при отрицательных температурах (–23...–29 °С). Многократное механическое повреждение мембраны под нагрузкой 8,50 кПа при температуре –26 °С не привело к ее разрыву. Прогобы мембраны при положительных температурах достигали 84 мм, при отрицательных температурах – 58,2 мм.

Испытания пленки показали ее сверхвысокие прочностные характеристики и на перспективность широкого использования пленки из этилен-тетрафторэтилена для создания комфортной среды в сооружениях, возводимых в Арктике и на других территориях России.

Ключевые слова: силовые испытания, пленка ЭТФЭ, мембрана, механическое повреждение

Для цитирования: Овсянников С.Н., Околичный В.Н. Результаты механических испытаний пленки из этилен-тетрафторэтилена // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 89–98.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-89-98

*S.N. OVSYANNIKOV, V.N. OKOLICHNYI,**Tomsk State University of Architecture and Building*

MECHANICAL STRENGTH TESTING OF ETHYLENE-TETRAFLUOROETHYLENE FILM

Abstract. Mechanical strength testing of ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) film is performed on the test machine INSTRON. The average elastic modulus of the film is 35.8 MPa. Under subsequent loading, the elastic-to-plastic stage transition occurs with decreasing elastic modulus to 1.78–2.71 MPa and then to 0.06–0.086 MPa.

* Исследование выполнено по заказу ФГУП «ГНПП «КРОНА» по теме «Поиск, исследование и анализ решений несущих, ограждающих конструкций и оснований для создания большепролетных климатических искусственных укрытий для условий районов Крайнего Севера и вечной мерзлоты» и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту FEMN-2020-0003.

Strength testing of the ETFE film 250 μm thick at 8.577 kPa uniformly distributed load does not lead to the film rupture either at positive (15–18 $^{\circ}\text{C}$) or negative temperatures (–23–29 $^{\circ}\text{C}$). A multiple damage of the film under an 8.50 kPa load at –26 $^{\circ}\text{C}$ does not lead to its disruption. The film bending at positive and negative temperatures reaches 84 and 58.2 mm, respectively.

Strength testing of the ETFE film demonstrates its ultra-high strength properties, and thus predicts its wide use in the formation of comfortable conditions in buildings created in Arctic and other territories of Russia.

Keywords: mechanical strength testing, polytetrafluorethylene, ethylene-tetrafluoroethylene film, membrane, elastic modulus

For citation: Ovsyannikov S.N., Okolichnyi V.N. Rezul'taty mekhanicheskikh ispytaniy plenki iz etilen-tetraftoretilena [Mechanical strength testing of ethylene-tetrafluoroethylene film]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 89–98.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-89-98

Активное освоение Арктической зоны России требует создания сверхлегких светопрозрачных конструкций большепролетных сооружений укрытий, обеспечивающих комфортную среду жизнедеятельности в условиях крайне сурового климата. Эти конструкции позволят размещать вахтовые поселки, жилые, производственные и сельскохозяйственных зоны северных гражданских и военных поселений, укрытые от низких температур, ураганных ветров и осадков. Подобные конструкции представляют интерес и для территорий Севера России, Сибири и Дальнего Востока.

В современном строительстве большепролетных сооружений со светопрозрачными покрытиями с успехом применяются пневматические подушки из пленки этилен-тетрафторэтилена (ЭТФЭ) в один или несколько слоев. Применение пленок ЭТФЭ позволяет реализовать практически любые идеи и замыслы архитекторов, что обусловлено не только архитектурной выразительностью таких сооружений, но и возможностью противостоять мощным ветрам, выдерживать низкие температуры и интенсивное воздействие ультрафиолетового излучения (рис. 1).



Рис. 1. Верхняя станция канатной дороги на лыжной горе Гайслахкогль, Австрия

Пленка ЭТФЭ обладает уникальными прочностными и физико-техническими свойствами, имеет малый объемный вес, высокие характеристики светопропускания, устойчива к солнечной радиации, безопасна при пожаре, а срок эксплуатации таких покрытий – до 50 лет. Исследованиям свойств пленки ЭТФЭ и ее применению посвящен целый ряд отечественных и зарубежных работ [1–18]. Практика строительства показала, что пленка ЭТФЭ использовалась в основном для пневматических ограждающих конструкций с умеренными условиями эксплуатации. Для суровых условий арктического побережья, с низкими температурами и значительной ветровой нагрузкой, необходимы дополнительные исследования.

В Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) проведены лабораторные силовые испытания образцов пленки ЭТФЭ и ячейки с пленкой ЭТФЭ в климатических камерах. Программа силовых испытаний включала в себя испытания на растяжение образцов пленки ЭТФЭ 250 мкм на разрывной машине INSTRON и испытания ячейки с пленкой в силовой треугольной раме со стороной 1260 мм при равномерном нагружении (имитация снеговых и ветровых нагрузок) при положительных и отрицательных температурах.

Силовые испытания пленки ЭТФЭ на разрыв

Силовые испытания пленки ЭТФЭ на разрыв выполнены на разрывной машине INSTRON для трех образцов пленки шириной 27,3, 27,0, 26,9 мм и длиной 207, 137, 92 мм (рис. 2).



Рис. 2. Силовые испытания пленки ЭТФЭ

Разрывная машина INSTRON создает пошаговое напряжение и на каждом шаге измеряет нагрузку, Н, напряжение, МПа, и относительное удлинение, мм/мм. Результаты эксперимента выдаются в виде таблиц Excel и графиков «напряжение–деформация». Так, например, для первого образца в таб-

личном виде представлены нагрузки от 5,858 Н на 1-м шаге и 164,841 Н на последнем 10068-м шаге нагружения. Удлинения составили на первом шаге 0,130 мм, на последнем шаге 419,364 мм. Здесь же определены напряжения на 1-м шаге 0,856 МПа, на последнем шаге 24,126 МПа. Общее время нагружения образца составляло 1006,176 с. График «напряжение–деформация» для первого образца показан на рис. 3.

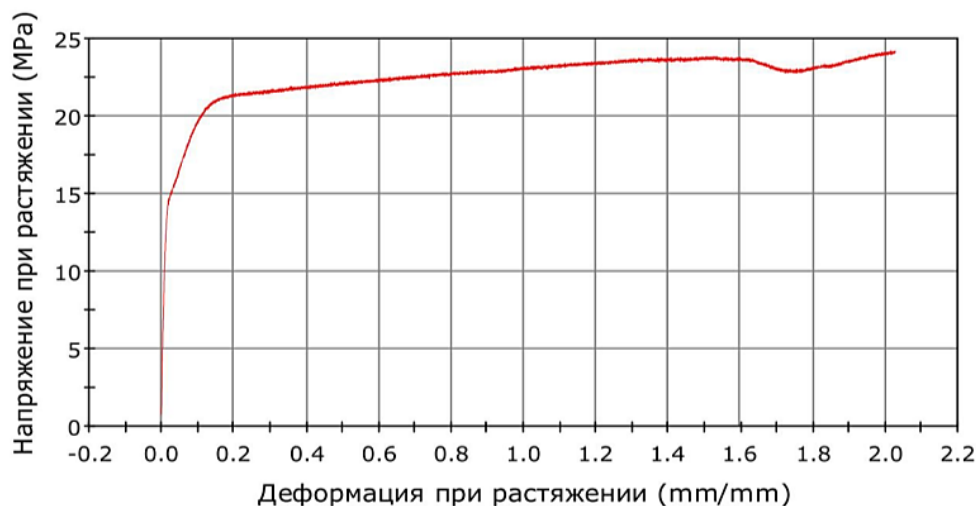


Рис. 3. График «напряжение–деформация» испытания пленки ЭТФЭ

Из рис. 3 видно, что зависимость «напряжение – деформации» имеет 3 характерных участка: начальный – «упругий» с высоким модулем упругости для всех образцов 35,8 МПа, второй – «упругопластичный» с модулем упругости 1,78–2,71 МПа и последний – «пластичный» с модулем упругости 0,06–0,086 МПа. Эта зависимость повторялась для всех исследованных образцов. Ни один из них не удалось разорвать в связи с ограниченностью хода разрывной машины. Начальный модуль упругости был определен по ГОСТ 34370–2017¹ в диапазоне нагрузок, соответствующих относительному удлинению от 0,1 до 0,3 %. Среднее значение начального модуля упругости для образцов пленки ЭТФЭ 250 мкм составило 1090 МПа, что несколько ниже, чем по результатам зарубежных исследователей [17–20].

Испытания на разрывной машине показали, что для проектирования пленочных конструкций следует произвести более обширные исследования пленочных материалов ЭТФЭ с целью определения расчетных модулей упругости в разных режимах нагружения. Особый интерес представляют измерения при отрицательных температурах, близких к расчетным (–55 °C) и абсолютно минимальным температурам (–63 °C) в Арктике.

¹ ГОСТ 34370–2017. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Москва: Стандартинформ. 2018. 21 с.

Силовые испытания треугольной ячейки с пленкой ЭТФЭ

Силовые испытания мембраны из пленки ЭТФЭ толщиной 250 мкм производились равномерно распределенными нагрузками, моделирующими снеговые и ветровые нагрузки. В соответствии с СП 20.13330.2016² арктические территории России по весу снегового покрова находятся в III и IV снеговых районах, а по давлению ветра – в III–VII ветровых районах со снеговой нагрузкой до 2,0 кПа и нормативным ветровым давлением до 0,85 кПа.

С учетом различных возможных сочетаний нагрузок на мембрану ЭТФЭ наружного слоя оболочки и вероятности образования «снеговых мешков» принято решение выполнить нагружение мембраны толщиной 250 мкм до 8,5 кПа, т. е. с четырёхкратной перегрузкой, при положительных и отрицательных температурах. Для проведения эксперимента были изготовлены силовые рамы треугольной формы с размерами, соответствующими проектным размерам ячеек проектируемого укрытия со стороной 1260 мм. Пленки ЭТФЭ крепились на них с использованием прижимных планок (рис. 4). Всего изготовлено и испытано шесть образцов пленки: три при положительных температурах 15–18 °С и три при отрицательных температурах –23...–29 °С.



Рис. 4. Силовая рама с мембраной из пленки ЭТФЭ

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. Москва.: Стандартинформ. 2018. 95 с.

Нагружение производилось плавно в 16 этапов (в среднем 15 мин на 1 этап) путем размещения на мембране мешочков с песком, предварительно навешанных по 1,0 кг. Нагрузка на этапе составляла около 28 кг. В свету силовой рамы площадь нагружаемой пленки составляла 0,528 м². На 16-м этапе мембрана нагружалась равномерной нагрузкой до 452,9 кгс, что соответствовало распределенной нагрузке 857,7 кгс/м², или 8,577 кПа (рис. 5). В процессе испытаний производилось выдерживание мембраны под нагрузкой с целью определения дополнительных прогибов во времени. На каждом этапе осуществлялось определение прогибов по центру мембраны с использованием лазерного дальномера с точностью измерения 1 мм.



Рис. 5. Силовые испытания пленки ЭТФЭ на 16-м этапе загрузки при положительной температуре

После разгрузки мембраны и ее снятия с рамки производилось измерение толщины мембраны после растяжения с применением микрометра МКЦ-25. Было выявлено, что толщина пленки ЭТФЭ до эксперимента составляла 250 мкм, после нагружения – 245 мкм, т. е. толщина пленки по центру исследуемой мембраны уменьшилась на 5 мкм.

По итогам силовых испытаний пленки ЭТФЭ толщиной 250 мкм выявлено, что прогибы пленки при нагрузках до 8,5 кПа не превышали 84 мм при положительных температурах и 58,2 мм при отрицательных температурах, а сама пленка не подавала признаков разрушения (рис. 6). После разгрузки с течением времени пленка практически восстанавливает первоначальную форму.

На последнем образце, нагруженном равномерно распределенной нагрузкой 8,581 кПа, были выполнены порезы мембраны ножом (13 раз) при температуре в камере –26 °С, однако это не привело к разрушению мембраны (рис. 7).



Рис. 6. Силовые испытания пленки ЭТФЭ на 16-м этапе загрузки при отрицательной температуре в климатической камере ТГАСУ

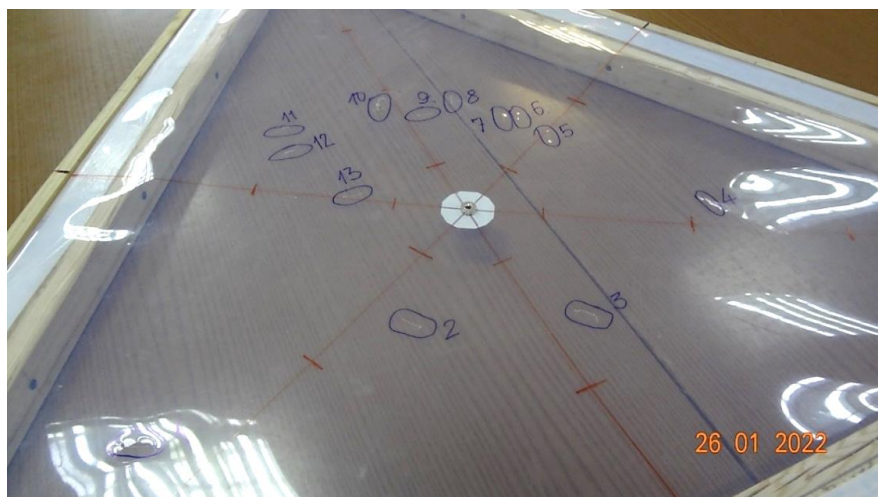


Рис. 7. Мембрана из пленки ЭТФЭ с порезами после снятия нагрузки

Выводы

Силовые испытания пленки ЭТФЭ показали ее сверхвысокие прочностные характеристики при положительных и отрицательных температурах, устойчивость к повреждениям целостности мембраны. Материал очень перспективен для создания сооружений укрытий с комфортной средой обитания для Арктической зоны и других территорий России.

Результаты испытания на разрывной машине показали, что для проектирования пленочных конструкций следует произвести более обширные исследования пленочных материалов ЭТФЭ с целью уточнения расчетных модулей упругости в разных режимах нагружения и при более низких температурах до -70°C .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Новое в технологии соединений фтора* : пер. с японск. / под ред. Н. Исикавы. Москва : Мир, 1984. 592 с.
2. Houtman R., Llorens J.I. Materials used for architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. P.101–120.
3. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria // *Constr. Build. Mater.* 2001. 15 (7). P. 323–327.
4. Chilton J. Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture // *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.* 2013. 166 (6). P. 343–357.
5. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. 2015. P. 203–219.
6. Robinson L.A. Structural Opportunities of ETFE (Ethylene Tetra Fluoro Ethylene). Massachusetts Institute of Technology, 2005. P. 66.
7. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior // *Construction and Building Materials*. 2017. 131. P. 411–422.
8. Chen W. Design of Membrane Structure Engineering // China Building Industry Press. 2010.
9. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: testing and modelling // *Constr. Build. Mater.* 2014. 60. P. 63–72.
10. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil // *Mech. Time-Depend. Mater.* 2015. 19 (1). P. 21–34.
11. Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S. Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures // *Spat. Struct.* 2010. 16 (4). P. 38–43.
12. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading // *J. Build. Mater.* 2015. 18 (1). P. 69–75.
13. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils // *Constr. Build. Mater.* 2014. 63 (1). P. 311–319.
14. Schmid G. ETFE cushions and their thermal and climatic behavior // *Tensinet Symposium*. Milan, Italy, 2007. P. 115–125.
15. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPV/T ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system // *Energy Build.* 2014. 69 (1). P. 394–406.
16. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter // *J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)*. 2014. 48 (10). P. 1816–1821.
17. Zehentmaier S. Fluoropolymers in Film Applications // 27th Annual World Symposium on Performance Films. Duesseldorf. April. 2012.
18. Цеентмайер С. Пленочные фторполимеры / пер. А.П. Сергеевкова // *Полимерные материалы*. 2018. № 8. С. 30–38.

19. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer 1. Crystal structure // *Polymer*. 1986. 27 (7). P. 999–1006.
20. Kawabata M. Viscoplastic Properties of ETFE Film and Structural Behavior of Film Cushion // International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Venice, Italy, 2007.

REFERENCES

1. Isikava N., (Ed.) *Novoe v tekhnologii soedinenii ftora* [New in fluorine compound technology]. Moscow: Mir, 1984. 592 p. (rus)
2. Houtman R., Llorens J.I. Materials used for architectural fabric structures. In: *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. Pp. 101–120.
3. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria. *Construction and Building Materials*. 2001. V. 15. No. 7. Pp. 323–327.
4. Chilton J. Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban Design and Planning*. 2013. V. 166. No. 6. Pp. 343–357.
5. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures. In: *Fabric Structures in Architecture*. 2015. Pp. 203–219.
6. Robinson L.A. Structural opportunities of ETFE (ethylene tetra fluoroethylene). Massachusetts Institute of Technology, 2005. P. 66.
7. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. *Construction and Building Materials*. 2017. V. 131. Pp. 411–422.
8. Chen W. Design of membrane structure engineering. China Building Industry Press, 2010.
9. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: Testing and modelling. *Construction and Building Materials*. 2014. 60. P. 63–72.
10. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2015. V. 19. No. 1. Pp. 21–34.
11. Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S. Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures. *Spatial Structure*. 2010. V. 16. No. 4. Pp. 38–43.
12. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading. *Building Materials*. 2015. V. 18. No. 1. Pp. 69–75.
13. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils. *Construction and Building Materials*. 2014. V. 63 No. 1. Pp. 311–319.
14. Schmid G. ETFE cushions and their thermal and climatic behavior. Tensinet Symposium, Milan, Italy, 2007. Pp. 115–125.
15. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPV/T ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system. *Energy and Buildings*. 2014. V. 69. No. 1. Pp. 394–406.
16. Hu J., Chen W., Zhao B., Song H. Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter. *The Journal of Zhejiang University*. 2014. V. 48. No. 10. Pp. 1816–1821.
17. Zehentmaier S. Fluoropolymers in Film Applications. In: *Proc. 27th Annual World Symposium on Performance Films*. Duesseldorf. April. 2012.
18. Zehentmaier S. Plenochnye ftoropolimery [Film fluoropolymers]. *Polimernye materialy. Izdeliya, oborudovanie, tekhnologii*. 2018. No. 8. Pp. 30–38. (transl. from Germ.)
19. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer: 1: Crystal structure. *Polymer*. 1986. V. 27 No. 7. Pp. 999–1006.
20. Kawabata M. Viscoplastic properties of ETFE film and structural behavior of film cushion. In: International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Venice, Italy, 2007.

Сведения об авторах

Овсянников Сергей Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ovssn@tsuab.ru

Околичный Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, okolichnyi@mail.ru

Authors Details

Sergei N. Ovsyannikov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ovssn@tsuab.ru

Vasilii N. Okolichnyi, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, okolichnyi@mail.ru

УДК 624.011

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-99-109

*Е.А. ЧАЙКИН,**Сибирский федеральный университет*

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛА СТРУКТУРНОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИНАХ

Аннотация. В рамках формообразования строительных конструкций для успешного применения конструкции полносборного здания замкнутого типа, узлы которого выполнены на основе болтового соединения стальных клеенных в деревянные стержни пластин, необходимо провести численные исследования всех элементов, входящих в конструкцию узла, определить его деформативность, предельные усилия в элементах при действующих нагрузках, сравнить полученные результаты с экспериментом.

На основе данного анализа можно сделать выводы о надежности принятых в узле решений, скорректировать характеристики податливости узлов в модели полносборного здания, определить границы области применения данного узла в структурных много-связных конструкциях или других конструкциях узлов деревянных стержней с соединительными элементами на клеенных стальных пластинах.

Ключевые слова: клеенные пластины, структурная конструкция, шарнирный узел, деревянные конструкции, численные исследования

Для цитирования: Чайкин Е.А. Изучение напряженно-деформированного состояния узла структурной конструкции на клеенных стальных пластинах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 99–109.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-99-109

*Е.А. CHAYKIN**Siberian Federal University*

STRESS-STRAIN STATE OF GLUED WOOD-TO-STEEL PLATE JOINT

Abstract. In terms of shaping of building structures, numerical calculations are required for the structural unit elements, deformability, limit forces under loads for a successful application of fully-prefabricated building structures of a closed type with glued wood-to-steel plate bolt joints. As a result, theoretical calculations are compared with the experimental data.

It is shown that the proposed decisions concerning the structural units are reliable. The yielding parameters of the structural units are corrected in the model of the fully-prefabricated building. The scope of application is determined for the units of multi-connected structures or structures with glued wood-to-steel plate joints.

Keywords: glued wood-to-steel plate, structure, flexible joint, wooden structures, numerical calculations

For citation: Chaikin E.A. Izuchenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzla strukturnoi konstruksii na vkleennykh stal'nykh plastinakh [Stress-strain state of glued wood-to-steel plate joint]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo

arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 99–109.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-99-109

Структурные конструкции находят всё больше вариантов применения при строительстве современных зданий. В последнее время структуры охотно используются архитекторами и инженерами для спортивных залов, стадионов, культурных центров, аэровокзалов, промышленных зданий, гаражей и ангаров, в высокоширотном строительстве [1]. Такую популярность можно объяснить естественными преимуществами данных пространственных конструкций, которыми не обладают традиционные рамные и каркасные системы. Благодаря изготовлению укрупненных блоков на заводе можно значительно снизить трудоемкость и время монтажа на строительной площадке; многосвязность и статическая неопределенность наделяют конструкции повышенной стойкостью к деформациям, узловым нагрузкам и выключению отдельных элементов из работы. Как правило, пространственные структуры состоят из простых готовых типовых модулей с одинаковыми размерами, формами и узлами сопряжения. Из таких блоков на площадке могут быть легко собраны не только пролётные строения зданий, но также, в некоторых случаях, имеет смысл возводить всё здание из однотипных структурных блоков. Такие разработки уже проводились Н.П. Абовским [2] и В.В. Захарютой [3] в Сибирском федеральном университете (рис. 1).

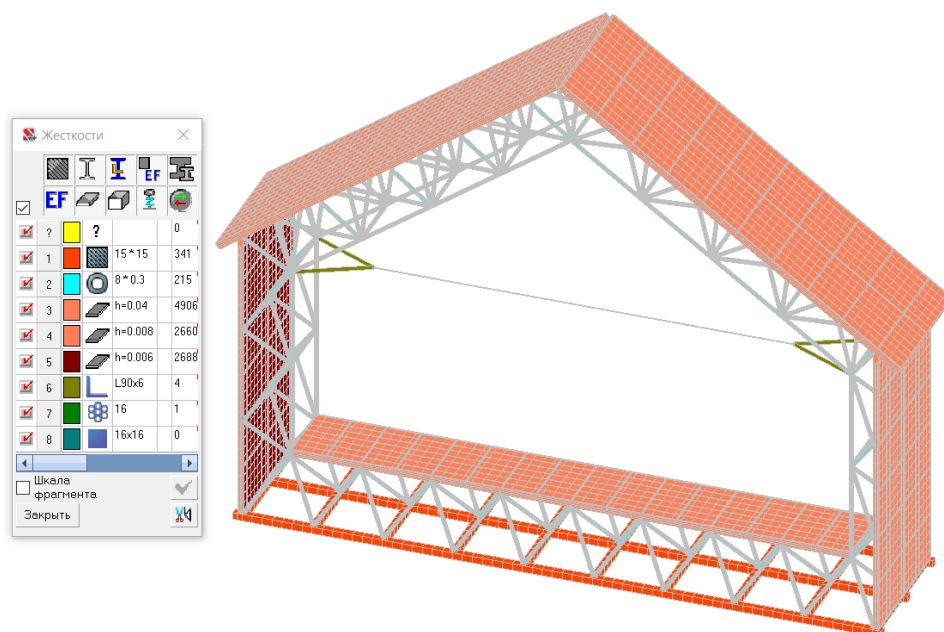


Рис. 1. Расчетная схема блока здания замкнутого типа

Выбор и конструирование узловых соединений элементов структурных конструкций является важнейшим этапом при разработке всей системы и от-

ражается не только на деформативности и надежности всей системы, но и на конечном коммерческом результате. Ошибки, допущенные при проектировании узлов, могут привести к чрезмерным тратам на их изготовление, к повышенной металлоемкости; усложнить сборку конструкции; привести к неправильной ее работе и образованию нежелательных начальных усилий и конечных деформаций; здание при эксплуатации может быть «зыбким». Поэтому столь важно рассматривать конструкцию узлового соединения комплексно, со всех позиций, в то же время детально прорабатывая каждый его элемент.

Многосвязевые структурные конструкции, и в особенности полносборные конструкции замкнутого типа, обладают способностью перераспределения усилий в элементах. В результате снижаются значения усилий в конструкции при возникновении дополнительных напряжений от таких факторов, как неточность изготовления элементов, податливость узловых соединений, неравномерность натяжения поясов, неравномерная осадка основания. Эти факторы должны быть учтены и проанализированы в процессе инженерного расчета.

В серии предварительных расчетов были проанализированы полносборные здания пролётами от 9 до 18 м с модулем от 0,5 до 1 м. При больших пролётах для обеспечения требуемой прочности и жесткости требуется увеличение модуля, что ведет к частичной потере устойчивости деревянных стержней и замене их на стальные элементы. При малых пролётах соотношение полезного объема здания к объёму конструкций получается низким, что влечет удорожание строительства и эксплуатации зданий. Среди разработанных структурных конструкций наиболее эффективна и интересна с точки зрения широкой области применения структура с пролётом 12 м и модулем 0,75 м. Примем эту конструкцию в качестве объекта изучения с помощью численных исследований ее напряженно-деформированного состояния (НДС). Структура рассчитана на восприятие нагрузок и воздействий, характерных для III снегового района (нормативная нагрузка 1,5 кПа), III ветрового района (нормативное ветровое давление 0,38 кПа) в соответствии с СП 20.13330.2016. В процессе изучения допускаются незначительные видоизменения конструкции для проведения комплексного анализа и поиска рациональных решений.

С целью изучения НДС структурной конструкции выполнены численные исследования фрагмента структуры и детально рассмотрено состояние наиболее нагруженного узла [4] сопряжения (рис. 2).

В процессе изучения напряженно-деформированного состояния узловых деталей, а именно болтов и соединительных пластин, был вырезан и смоделирован в программном комплексе SolidWorks узел, в котором при подавляющем большинстве расчетных схем, описанных выше, получались наиболее высокие значения усилий в элементах конструкции, – внутренний карнизный узел. В этом узле соединяются стержень нижнего пояса покрытия, внутренний вертикальный стеновой стержень, затяжка, два раскоса конструкции покрытия и четыре раскоса конструкции стены.

Вклеивание стальных элементов в узлах деревянных конструкций хорошо себя зарекомендовало и было описано в трудах многих авторов [5–8]. От глубины вклейки пластин в древесину и толщины пластины напрямую зависит несущая способность рассматриваемого узла. На основании опыта по

вклеиванию пластин [9–12] все стальные соединительные пластины заданы вклеенными на 7 см в стержневой деревянный элемент диаметром 10 см («карандаш»). Пластины заданы из стали марки Ст3пс толщиной 3 мм с диаметром отверстий 13 мм под болты М12 согласно [13]. Данные параметры позволяют достичь условия равнопрочности всех соединяемых элементов. Податливость в узле учитывается автоматически в процессе расчета за счет задания диаметра отверстий под болты больше номинального диаметра болта.

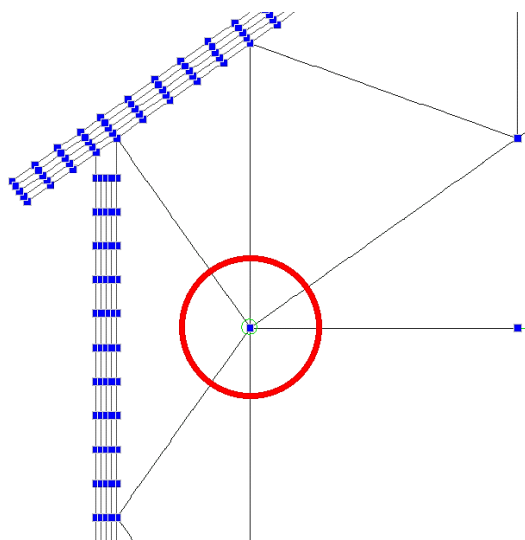


Рис. 2. Рассматриваемый узел конструкции

На все стержневые элементы приложены нагрузки, равные по значению усилиям, взятым с недеформированной расчетной схемы с плитами ограждения, включенными в работу конструкции, и затяжкой на отм. +3.790 (рис. 3), а именно:

1 – на элемент нижнего пояса покрытия	15,68 кН
2 – на элемент вертикальной стойки	–11,46 кН
3 – на раскос покрытия	–8,09 кН
4 – на верхний раскос стены	3,23 кН
5 – на нижний раскос стены	–5,9 кН
6 – на болт от затяжки	10,43 кН

Численный расчет, выполненный по методу конечных элементов на базе программного комплекса SolidWorks, предполагает проверку работы узловых элементов в недеформированной схеме, поэтому граничные условия были заданы типа «ползун» по цилиндрическим поверхностям деревянных стержней, сопряжение на контакте металл-клей-древесина жесткое, трение между пластинами в узле отсутствует. При этом были проанализированы основные факторы: суммарные напряжения в «карандашах» (рис. 4), суммарные напряжения в стальных пластинах (рис. 5, 6), перемещения узла под действием заданных нагрузок (рис. 7), запас прочности элементов узла (рис. 8).

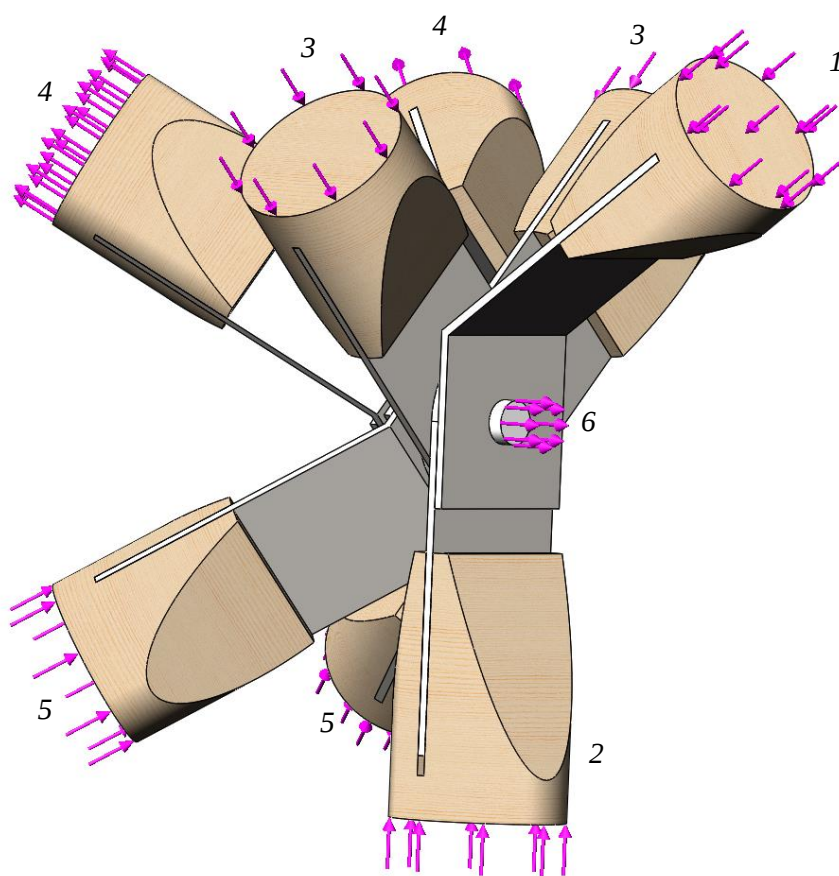


Рис. 3. Расчетная схема наиболее нагруженного узла конструкции:

1 – на элемент нижнего пояса покрытия; 2 – на элемент вертикальной стойки; 3 – на раскос покрытия; 4 – на верхний раскос стены; 5 – на нижний раскос стены; 6 – на болт от затяжки

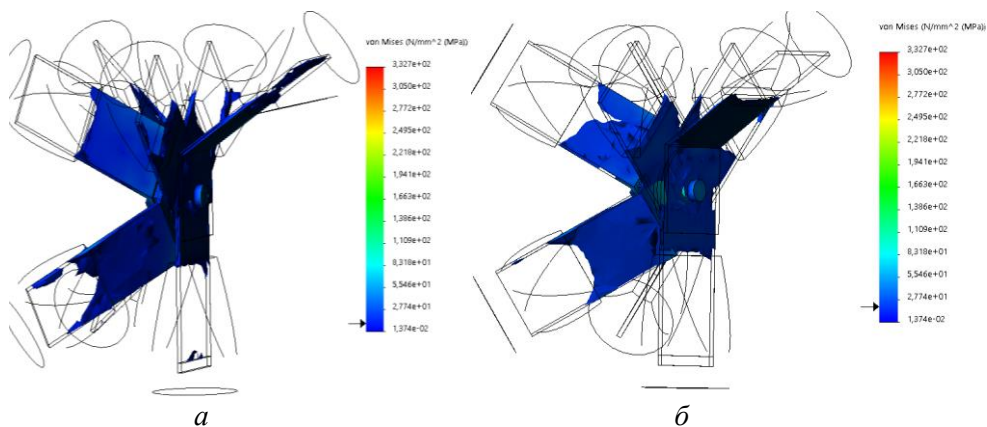


Рис. 4. Напряжения по Мизесу:

а – $s < 10,5$ МПа; б – $s < 19,5$ МПа

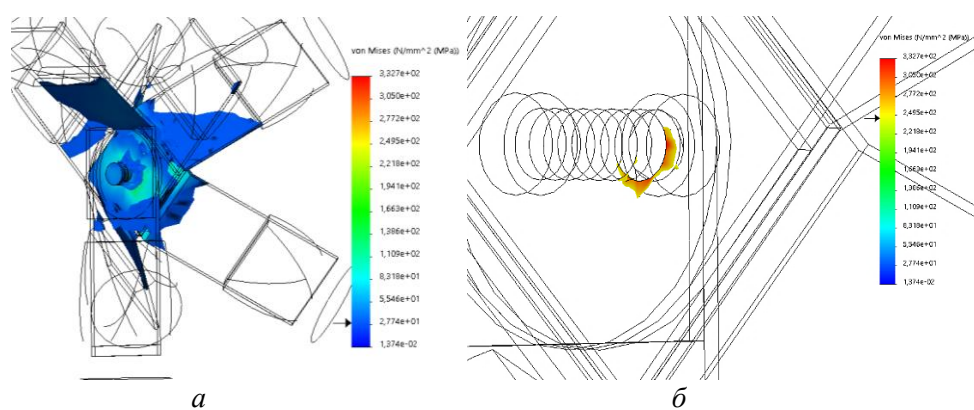


Рис. 5. Напряжения по Мизесу:
 $a - s \geq 30$ МПа; $b - s \geq 245$ МПа

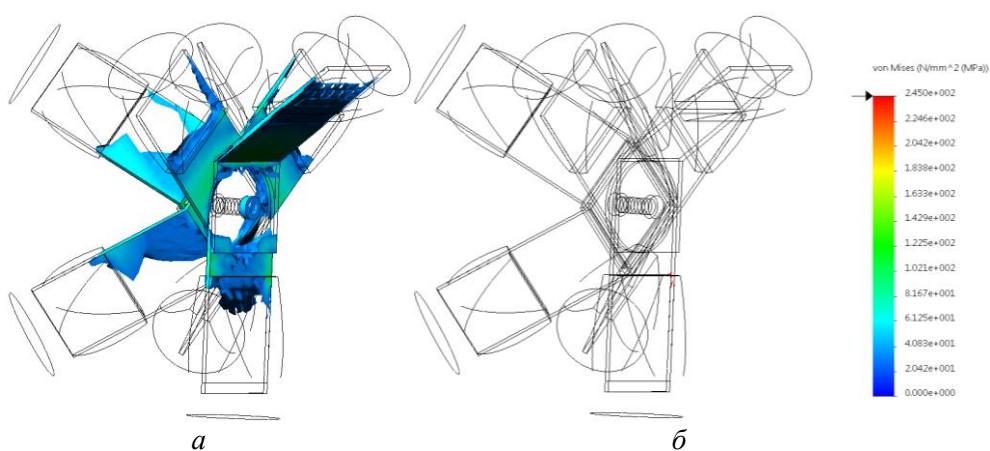


Рис. 6. Напряжения по Мизесу:
 $a - s \geq 30$ МПа; $b - s \geq 245$ МПа

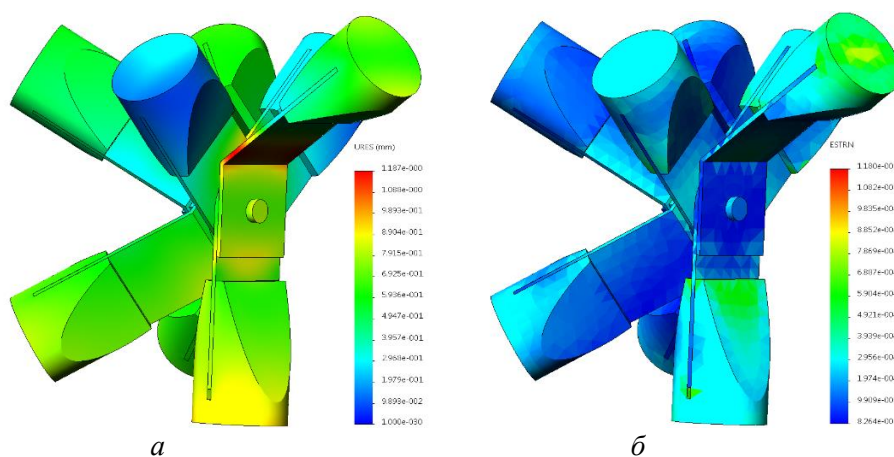


Рис. 7. Деформации в узле:
 $a -$ абсолютные, мм; $b -$ относительные

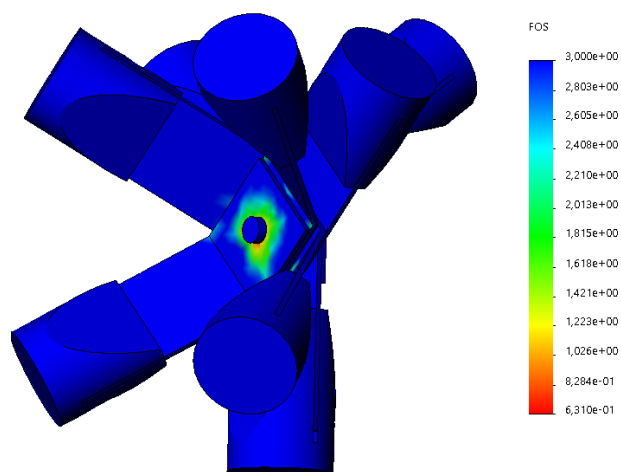


Рис. 8. Коэффициент запаса прочности

Наступление предельного состояния узла возможно либо при появлении пластических деформаций, либо при разрушении. При одноосном напряженном состоянии оценить момент появления деформаций текучести или момент разрушения можно, сопоставляя максимальное напряжение с пределом текучести или временным сопротивлением стали. В случае объемного напряженного состояния задача значительно усложняется. Необходимо установить уровень главных напряжений в элементе, при достижении которых произойдет переход от упругого состояния к предельному. Такой уровень напряжений может быть установлен с помощью критериев пластичности (текучести) или прочности (разрушения). Множество критериев объясняется тем, что процесс наступления предельного состояния в металле еще недостаточно изучен, а процесс разрушения на контакте металл-клей-древесина изучен в ещё меньшей степени. Критерии текучести или прочности должны дать возможность сравнения степени опасности различных напряженных состояний материала. Сравнение удобно выполнять, если одно из напряженных состояний считать основным – эквивалентным.

Одним из критериев пластичности является критерий удельной энергии изменения формы. При появлении пластических деформаций предельного значения достигает та часть удельной потенциальной энергии, которая обусловлена изменением формы. Критерий удельной потенциальной энергии изменения формы называют энергетической теорией прочности, или критерием максимального напряжения по Мизесу [2], основанным на теории Мизеса – Генки (Mises–Hencky), также известной как теория энергии формоизменения. Этот критерий считается наиболее точным для пластичных материалов с одинаковыми свойствами при растяжении-сжатии, т. е. вполне подходит для строительных сталей, из которых изготовлены основные элементы рассматриваемого узла.

В вычислениях главных напряжений s_1 , s_2 и s_3 напряжение по Мизесу выражено как

$$s_{vonMises} = \sqrt{\left[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_1 - s_3)^2\right] / 2}.$$

Согласно данному подходу, пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В данном эксперименте предел текучести используется в качестве предельного напряжения для элементов узла

$$s_{vonMises} > s_{\text{предел}}.$$

Коэффициент запаса прочности

$$FOS = \frac{s_{\text{предел}}}{s_{vonMises}}.$$

При этом критичным для анализа узла было недостижение в материалах напряжений больших, чем расчетные сопротивления этих материалов, которые в случае работы стержней на сжатие будут равны 10,5 МПа; растяжение – 19,5 МПа; для стальных пластин – 245 МПа; для болтов класса прочности – 8,8–320 МПа. Поэтому изометрические объемные поля напряжений показаны на рис. 4–6 в двух вариантах – медианные напряжения для заданного материала и напряжения, равные расчетному сопротивлению материала.

Полученные в результате численного эксперимента значения деформаций, эквивалентных напряжений по Мизесу и коэффициентов запаса для элементов узла приведены на рис. 4–8. Эквивалентные напряжения в контактных зонах дерево-клей-стальная пластина не превышают значения предела прочности древесины «карандаша» $\sigma = 10,5/19,5$ МПа, а эквивалентные напряжения в стальных пластинах не превышают предела текучести $\sigma_t = 245$ МПа, кроме небольшой области на контакте с болтом, где может происходить смятие, что подтверждается экспериментом. Проведенные численные исследования показали, что в узлах структурной конструкции полносборного здания возникают пластические деформации на контакте в зонах дерево-клей-стальная пластина, особенно в торце стальных пластин. В последующих разработках данный узел можно усовершенствовать, включив в конструкцию подобие анкерного устройства на торце пластин или дополнительно усилив клеевой узел стягивающими болтами, перпендикулярными пластине, для создания эффекта обоймы и более надежной работы клеевого соединения.

Анализ результатов конечно-элементного моделирования узла структурной конструкции позволяет сделать вывод о его надежности. Такая конструкция узла может быть использована для здания с пролётом 12 м и модулем 0,75 м.

Выводы

На основании проведенного анализа НДС узла структурной конструкции замкнутого типа можно сделать следующие выводы:

1. В основном напряжения в «карандашах» в смежной с узлом зоне составляют 3–6 МПа при пределе прочности на сжатие и растяжение вдоль волокон 10 МПа. Незначительное количество (< 1 %) материала карандашей превысило напряжение в 10 МПа, однако в результатах расчета такое напря-

жение получено только на границе дерево-клей-металл, где присутствует эпоксидный клей с пределом прочности > 16 МПа. Также данные значения могли быть получены в результате неравномерностей, связанных с созданием объемной сетки конечных элементов.

2. Напряжения в стальных пластинах, соединенных в узле на болте, не превышают предела текучести стали и в основном достигают значений 30–100 МПа.

3. Деформации стальных элементов узла не превышают предельных и хорошо согласуются с данными, полученными при расчете в программном комплексе SCAD Office.

4. Эпюра запаса прочности не показала элементов с запасом меньше 1, наружные области «карандашей» имеют запас в 4–5 раз, внутренние – в 2–3 раза, контактирующие с металлом – около 1; в стальных пластинах углы, контактирующие с другими пластинами, обладают запасом прочности 2–3, центр пластин – от 3, локальные области сопряжения с болтом и склейки с деревом обладают запасом прочности 1,5–2.

5. Принятые для карнизного узла структурной конструкции полносборного здания замкнутого типа сечения элементов, классы материалов и способы соединения элементов в узле друг с другом позволяют говорить о надежности данного решения в пределах его зоны применения, а именно в конструкции с пролетом 12 м и модулем 0,75 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Inzhutov I., Zhadanov V., Semenov M., Amelchugov S., Klimov A., Melnikov P., Klinduh N. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils // E3S Web of Conferences: SPbWOSCE-2018. 2019. V. 110. P. 01019.
2. Абовский Н.П., Енджиевский Л.В., Инжутов И.С., Деордиев С.В., Палагушкин В.И. Формообразование строительных конструкций. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. 184 с.
3. Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Деордиев С.В., Захарюта В.В. Полносборное здание замкнутого типа с каркасом из отходов фанерного производства // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 40–50.
4. Патент № RU 2705118 C1 Российская Федерация. Узловое соединение деревянных стержней / Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В., Чайкин Е.А. 2019. 7 с.
5. Rudnev I., Zhadanov V., Garipov V. Validation of the calculation of a wooden column with a support unit on glued steel plates // E3S Web of Conferences: 24, Moscow. Moscow, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302054
6. Лисицкий И.И., Руднев И.В. Проблемы увеличения несущей способности клеевого соединения стальных пластин с древесиной // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2018. С. 283–286.
7. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). Москва : РИФ «Стройматериалы», 2013. 308 с.
8. Пересыпкина В.А., Жаданов В.И. Стальные клеенные пластины в узловых соединениях деревянных конструкций // Шаг в науку. 2021. № 1. С. 94–97.
9. Руднев И.В. Узловые соединения деревянных элементов на клеенных стальных пластинах : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.23.01. Пенза, 2015. 176 с.
10. Руднев И.В., Жаданов В.И. Выдергивание стальных пластин, клеенных в древесину. Аналитический расчет и эксперимент // Вестник Чувашского государственного педагогического университета. 2021. № 1. С. 10–15.

- гического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 3. С. 9–18.
11. Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В., Украинченко Д.А. Способы повышения несущей способности соединений деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 5. С. 31–43.
 12. Жаданов В.И., Лисицкий И.И., Пересыпкина В.А. Клеенные плоские пластины в узлах сквозных деревянных конструкций // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2021. С. 135–140.
 13. Рекомендации по проектированию структурных конструкций / Центр. НИИ строит. конструкций им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР. Москва : Стройиздат, 1984. 303 с.

REFERENCES

1. Inzhutov I., Zhadanov V., Semenov M., Amelchugov S., Klimov A., Melnikov P., Klinduh N. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils. *E3S Web of Conferences*. 2019. V. 110. 01019.
2. Abovskiy N.P., Yendzhiyevskiy L.V., Inzhutov I.S., Deordiyev S.V., Palagushkin V.I. Formoobrazovaniye stroitel'nykh konstruktsey [Formation of building structures]. Krasnoyarsk: SFU, 2013. 184 p. (rus)
3. Inzhutov I.S., Dmitriyev P.A., Zhadanov V.I., Deordiyev S.V., Zakharyuta V.V. Polnosbornoye zdaniye zamknutogo tipa s karkasom iz otkhodov fanernogo proizvodstva [Fully-prefabricated building of closed type with veneer waste frame]. *Vestnik MGSU*. 2013. V. 7. Pp. 40–50. (rus)
4. Lisitskiy I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V., Chaykin E.A. Uzlovoye soyedineniye derevyannykh sterzhney [Joint connection of wooden rods]. Patent Rus. Fed. N 2705118 C1. 2019. 7 p. (rus)
5. Rudnev I., Zhadanov V., Garipov V. Validation of the calculation of a wooden column with a support unit on glued steel plates. *E3S Web of Conferences*. 2021. DOI:10.1051/e3sconf/202126302054
6. Lisitskiy I.I., Rudnev I.V. Problemy uvelicheniya nesushchey sposobnosti kleyevogo soyedineniya stal'nykh plastin s drevesinoy [Bearing capacity improvement of glued wood-to-steel plate joints]. In: Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii (*Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'University as a Regional Center of Education, Science and Culture'*). Orenburg, 2018. Pp. 283–286. (rus)
7. Turkovskiy S.B., Pogorel'tsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. Kleyenyte derevyannyye konstruktsey s uzlamy na vkleyennykh sterzhnyakh v sovremennom stroitel'stve (sistema TSNIISK) [Laminated wood structures with glued wood-to-steel rods in modern construction]. Moscow: Stroimaterialy, 2013. 308 p. (rus)
8. Peresypkina V.A., Zhadanov V.I. Stal'nyye vkleyennyye plastiny v uzlovyykh soyedineniyakh derevyannykh konstruktsey [Glued wood-to-steel plate joints]. *Shag v nauku*. 2021. V. 1. Pp. 94–97. (rus)
9. Rudnev I.V. Uzlovyye soyedineniya derevyannykh elementov na vkleyennykh stal'nykh plastinakh: dis. ... kand. tekhnich. nauk [Glued wood-to-steel plate joints. PhD Thesis]. Penza, 2015. 176 p. (rus)
10. Rudnev I.V., Zhadanov V.I. Vydergivaniye stal'nykh plastin, vkleyennykh v drevesinu. Analiticheskiy raschet i eksperiment [Pulling out steel plates glued into wood. Theoretical calculation and experiment]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Ser.: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2015. V. 3. Pp. 9–18. (rus)
11. Lisitskiy I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V., Ukrainchenko D.A. Spособы povysheniya nesushchey sposobnosti soyedineniy derevyannykh konstruktsey na stal'nykh vkleyennykh plastinakh [Bearing capacity improvement of glued wood-to-steel plate joints]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2018. V. 5. Pp. 31–43. (rus)
12. Zhadanov V.I., Lisitskiy I.I., Peresypkina V.A. Vkleyennyye ploskiye plastiny v uzlakh skvoznykh derevyannykh konstruktsey [Glued plate joints of open-web structures]. In: Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vse-

rossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem) (*Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'University as a Regional Center of Education, Science and Culture'*). Orenburg, 2021. Pp. 135–140. (rus)

13. Rekomendatsii po proyektirovaniyu strukturnykh konstruktsey [Recommendations for structural design]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 303 p. (rus)

Сведения об авторе

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

Author Details

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

УДК 624.072.221

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-110-129

Э.К. ОПБУЛ¹, А-Х.Б. КАЛДАР-ООЛ², ЛЕ КУАНГ ХЮИ¹,¹Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,²Тувинский государственный университет

ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЧНОСТИ ИЗГИБАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА В СРЕДЕ MATLAB

Аннотация. В статье приводятся деформационные модели расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов в программе Matlab. Универсальность деформационной модели заключается в возможности проведения контрольных тестов, например верификации конструктивных расчетов в стадии проектирования.

На основе нормативных диаграмм деформирования материалов и способа итерационных вычислений предлагаются два независимых друг от друга нелинейных расчёта. Одно из главных принятых условий методов заключается в том, что итерационные процессы начинаются при упругой работе элемента. Задачей итерационных вычислений является определение величины максимальной кривизны элемента и соответствующих ей деформаций. Критерием прочности методов являются расчетные деформации, величина которых не должна превышать допустимых значений, указанных в строительных нормах и правилах.

Приводятся алгоритмы расчетов в виде блок-схем, полученные результаты практических расчетов и выводы.

Ключевые слова: деформационная модель, нелинейный расчет, итерация, матрица жесткости, деформации, напряжения, железобетон

Для цитирования: Опбул Э.К., Калдар-оол А-Х.Б., Ле Куанг Хюи. Деформационная модель прочности изгибаемого элемента в среде Matlab // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 110–129.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-110-129

E.K. OPBUL¹, A-Kh.B. KALDAR-OOL², LE QUANG HUY¹,¹ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,² Tuvan State University

DEFORMATION MODELING OF BENDING ELEMENT STRENGTH IN MATLAB

Abstract. The paper presents the strength analysis of bending reinforced concrete elements in the MATLAB support package. The versatility of the deformation model is its ability to conduct control tests, for example, verification of structural analysis at the design stage.

Based on the standard stress-strain state diagrams of materials and iteration procedures, two independent nonlinear analyses are suggested. One of the main accepted conditions is that iteration procedures occur at the elastic behavior of the member. Iteration procedures determine the maximum member curvature and its deformation. The strength criterion is theoretically calculated deformation, which must not exceed permissible values specified in construction codes and regulations. Calculation algorithms are given in flowcharts. In conclusion, the results of experimental data are presented.

Keywords: deformation model, nonlinear strength analysis, iteration procedures, stiffness matrix, stress-strain state, reinforced concrete

For citation: Opbul E.K., Kaldar-Ool A-Kh.B., Le Kuang Khyui. Deformatsionnaya model' prochnosti izgibaemogo elementa v srede Matlab [Deformation modeling of bending element strength in Matlab]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 110–129
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-110-129

Введение

Объектом аналитического исследования является изгибающаяся железобетонная балка, находящаяся под действием равномерно распределенной нагрузки.

Предлагаемые методы, разработанные в программе Matlab, могут проводить расчёты прочности не только для тавровых или двутавровых сечений, но и могут быть адаптированы для более сложных форм поперечного сечения, например треугольной и круглой. При этом расхождения между результатами расчетов оказываются достаточно малы, порядка 1 %. Деформационные модели расчета могут быть эффективны и актуальны при проверке достоверности и надёжности проектных расчетов заказчика, когда уже определены несущая способность, трещиностойкость и жесткость элемента на изгиб.

Цель исследования – практическое применение деформационной модели при расчете прочности изгибаемых элементов в вычислительной среде Matlab.

Изгибаемым элементам посвящены исследования [1–5]. В работах [1–3] рассматривается довольно важный вопрос о наиболее безопасном и оптимальном проектировании конструкций, в котором используются аналитические и численные методы расчета. Актуальны исследования комбинированных изгибаемых элементов [4], состоящих сразу из нескольких материалов [5]: ламинированной фанеры, фибробетона [6–11], стали [12, 13] и композитной арматуры из полимеров [14, 15]. Есть исследования, в которых конструкционный материал одновременно не только прочный, но и легкий, армированный различными синтетическими полимерами [16, 17], коррозионностойкая нержавеющая сталь [18–22].

Известен нормативный документ¹, где приводится общая теория расчета железобетонных конструкций по деформационной модели. Применительно к изгибаемым элементам из фиброжелезобетона посвящены работы [23–26], в которых также использованы итерационные процедуры.

В работе [27] представлены ряд идей и формул для расчета изгибаемых железобетонных конструкций, основанные на методе проектирования UDM [28] и с традиционным подходом ACI [29]. Эти формулы и идеи имеют большое значение при обучении инженерных и конструкторских направлений, т. к. идея коэффициентов армирования наиболее понятна, чем декоративность материала.

¹ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Свод правил.

Исследования [30, 31] наглядно демонстрируют влияние нелинейных свойств бетона и арматуры на точность при расчете прогибов железобетонных балок. Подход к расчету основан на принципах нелинейного деформирования материалов и выполнен в виде численного эксперимента.

Моделирование поведения изгибаемых железобетонных балок с учетом реального напряженно-деформированного состояния представлено в работе [32]. Для улучшения физико-механических характеристик элементов конструкций на стадии проектирования конструкции необходимо оценить возможное сочетание влияний деформационных характеристик материалов, внешних нагрузок, технологии изготовления элементов конструкций и внешних условий окружающей среды.

Ниже представлены примеры расчета прочности изгибаемого железобетонного элемента по деформационной модели, также выполнен сравнительный расчет зарубежного аналога [18].

1. Метод расчета

1.1. Диаграммы деформирования материалов (бетон, арматура) согласно своду правил СП 63.13330.2018

На рис. 1 представлены полные диаграммы деформированного состояния бетона при сжатии и растяжении.

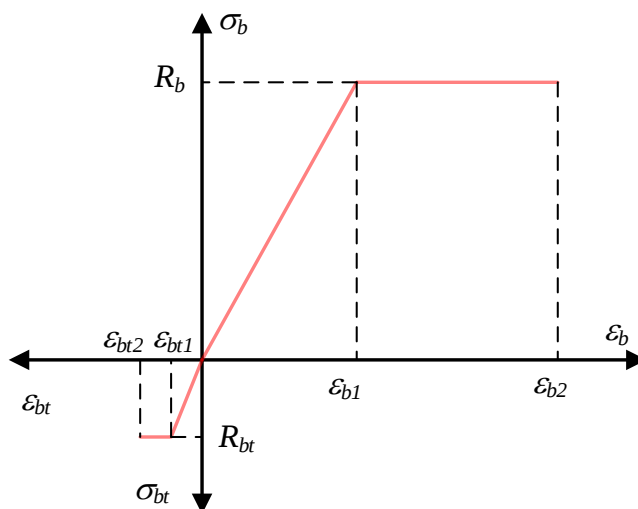


Рис. 1. Диаграмма деформирования бетона

В табл. 1 представлены расчетные формулы для напряжений и модулей бетона в зависимости от деформаций.

При этом $\varepsilon_{b1} = \varepsilon_{b1,red} = 15 \cdot 10^{-4}$; $\varepsilon_{b2} = 35 \cdot 10^{-4}$; $\varepsilon_{bt1} = \varepsilon_{bt1,red} = 8 \cdot 10^{-5}$; $\varepsilon_{bt2} = 15 \cdot 10^{-5}$.

На рис. 2 представлены полные диаграммы деформированного состояния арматуры при сжатии и растяжении.

Таблица 1

Напряжения и модули в бетоне при сжатии и растяжении

При сжатии			При растяжении		
ε	σ	E	ε	σ	E
$0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$	$\sigma_b = \varepsilon_b \cdot E'_b$	$E'_b = \frac{R_b}{\varepsilon_{b1,red}}$	$0 \leq \varepsilon_{bt} \leq \varepsilon_{bt1}$	$\sigma_{bt} = \varepsilon_{bt} \cdot E'_{bt}$	$E'_{bt} = \frac{R_{bt}}{\varepsilon_{bt1,red}}$
$\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$	$\sigma_b = R_b$	$E'_b = \frac{R_b}{\varepsilon_b}$	$\varepsilon_{bt1} < \varepsilon_{bt} \leq \varepsilon_{bt2}$	$\sigma_{bt} = R_{bt}$	$E'_{bt} = \frac{R_{bt}}{\varepsilon_{bt}}$
$\varepsilon_{b2} < \varepsilon_b$	$\sigma_b = 0$	$E'_b = 0$	$\varepsilon_{bt2} < \varepsilon_{bt}$	$\sigma_{bt} = 0$	$E'_{bt} = 0$

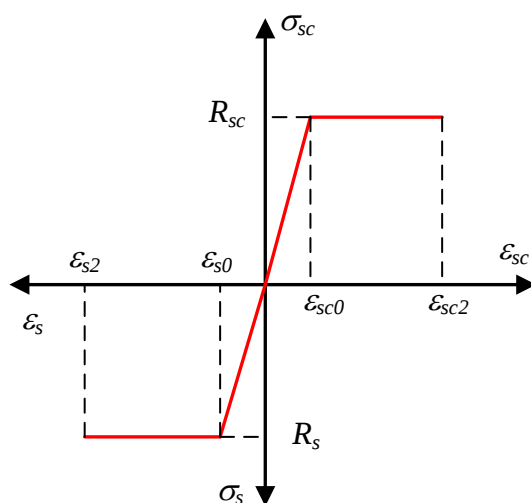


Рис. 2. Диаграммы деформированного состояния арматуры

В табл. 2 представлены расчетные формулы для напряжений и модулей арматуры в зависимости от деформаций.

Таблица 2

Напряжения и модули в арматуре

При сжатии			При растяжении		
ε	σ	E	ε	σ	E
$0 < \varepsilon_{sc} < \varepsilon_{sc0}$	$\sigma_{sc} = \varepsilon_{sc} \cdot E'_{sc}$	$E'_{sc} = \frac{R_{sc}}{\varepsilon_{sc0}}$	$0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s0}$	$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E'_s$	$E'_s = \frac{R_s}{\varepsilon_{s0}}$
$\varepsilon_{sc0} \leq \varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_{sc2}$	$\sigma_{sc} = R_{sc}$	$E'_{sc} = \frac{R_{sc}}{\varepsilon_{sc}}$	$\varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$	$\sigma_s = R_s$	$E'_s = \frac{R_s}{\varepsilon_s}$
$\varepsilon_{sc2} < \varepsilon_{sc}$	$\sigma_{sc} = 0$	$E'_{sc} = 0$	$\varepsilon_{s2} < \varepsilon_s$	$\sigma_s = 0$	$E'_s = 0$

При этом $\varepsilon_{sc0} = \frac{R_{sc}}{E_{sc}}$; $\varepsilon_{sc2} = 25 \cdot 10^{-3}$; $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s}$; $\varepsilon_{s2} = 25 \cdot 10^{-3}$.

1.2. Алгоритм расчёта первого метода

В первом деформационном методе расчета прочности изгибаемого железобетонного элемента алгоритм расчёта напряжений и деформаций выполняется согласно блок-схеме, представленной на рис. 3. Первая итерация начинается при условии упругой работы материалов нормального сечения. Затем, используя общеизвестные формулы, можно установить начальное положение нейтральной линии и вычислить кривизну элемента. Конец итерации заключается в определении деформаций и напряжений.

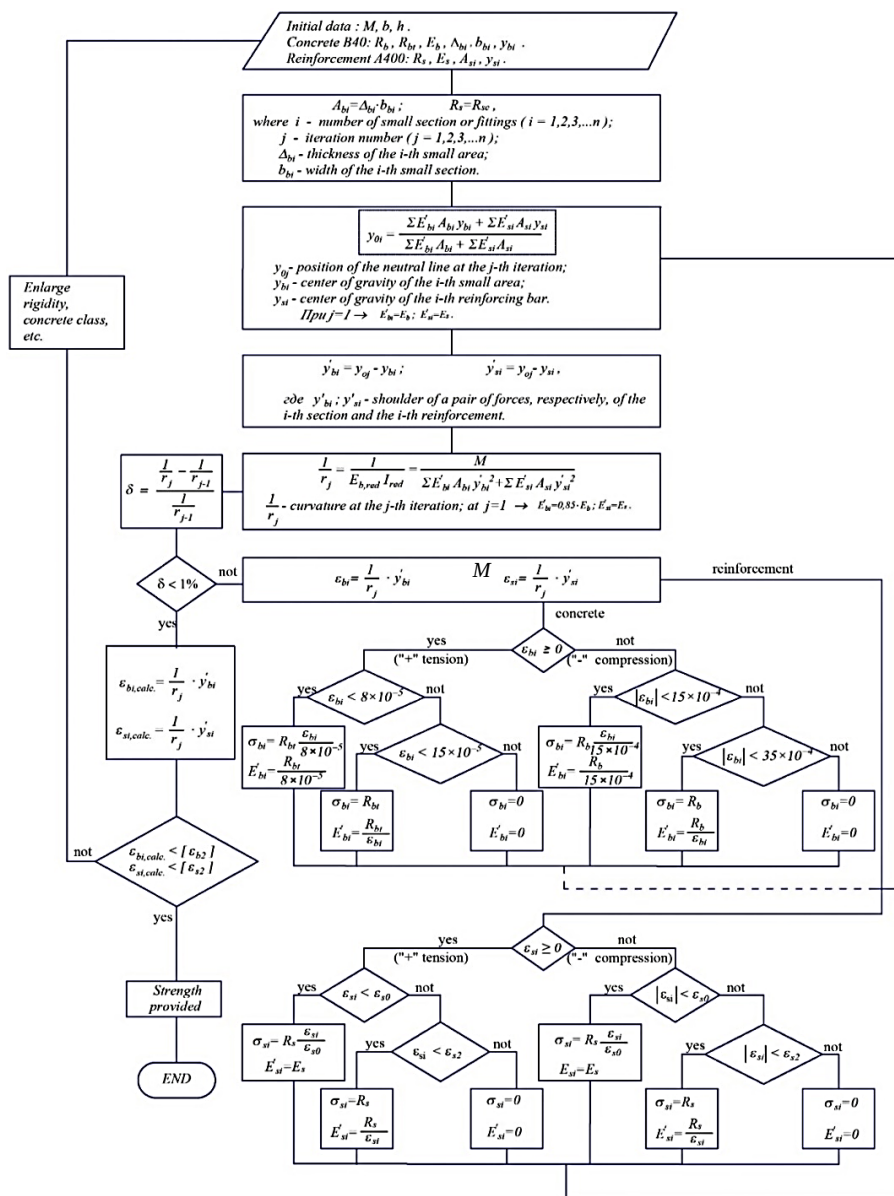


Рис. 3. Блок-схема первого метода

Последующая итерация начинается с определения модуля упругости (модуля деформаций) в зависимости от величины деформаций в элементарных (малых) участках сечения и нового положения нейтральной линии.

Итерационные вычисления заканчиваются тогда, когда будут установлены максимальная величина кривизны и соответствующие ей деформации в контролируемых точках нормального сечения. Контролируемыми точками являются крайняя сжатая фибра (бетон) и крайняя растянутая фибра (арматура) нормального сечения.

1.3. Алгоритм расчёта второго метода

Второй деформационный метод основан на использовании теории расчета, приведенной в СП 63.13330.2018, где кривизна определяется с помощью матрицы жесткостных характеристик поперечного сечения. Порядок расчета второго метода представлен на рис. 4.

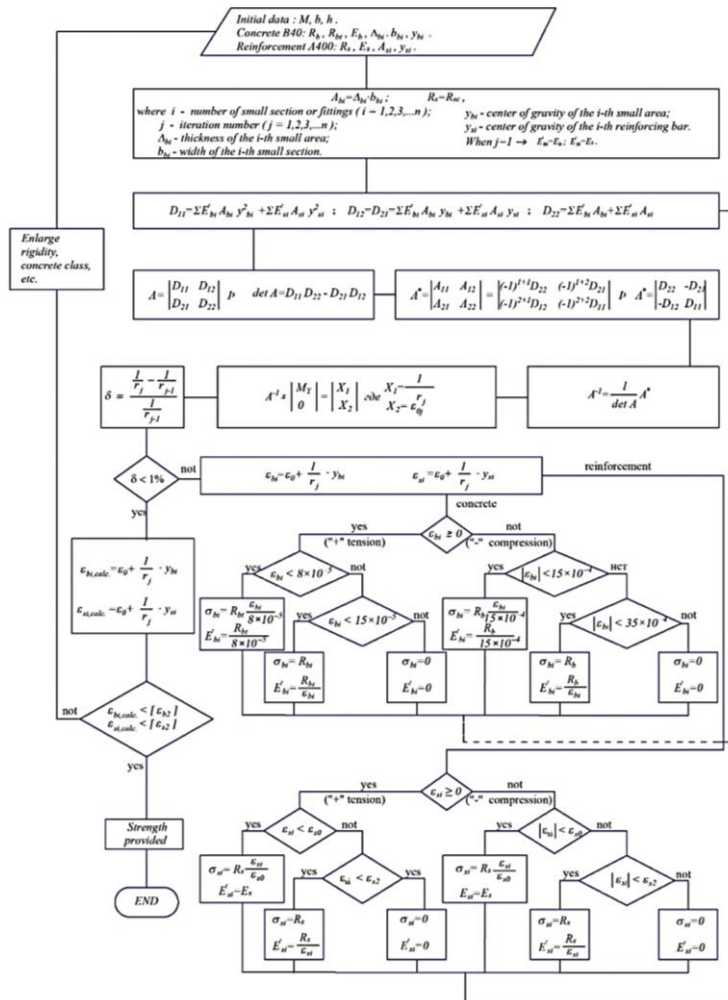


Рис. 4. Блок-схема второго метода

2. Пример расчета

Исходные данные:

класс бетона В40: $R_b = 22$ МПа, $R_{bt} = 1,4$ МПа, $E_b = 36000$ МПа.

Диаграммы состояния бетона и арматуры представлены на рис. 5 и 6.

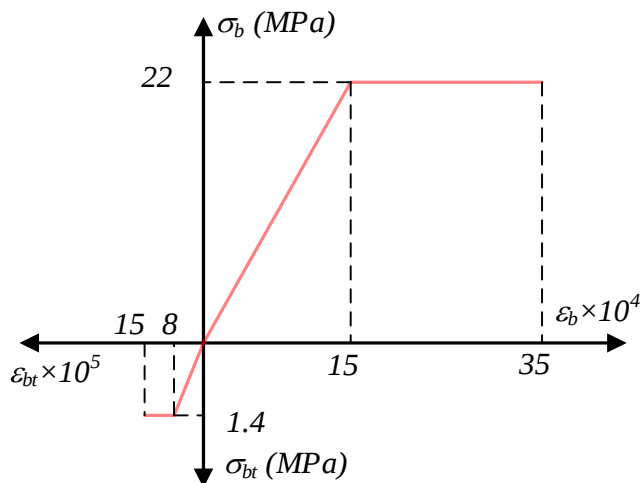


Рис. 5. Диаграммы состояния бетона класса В40

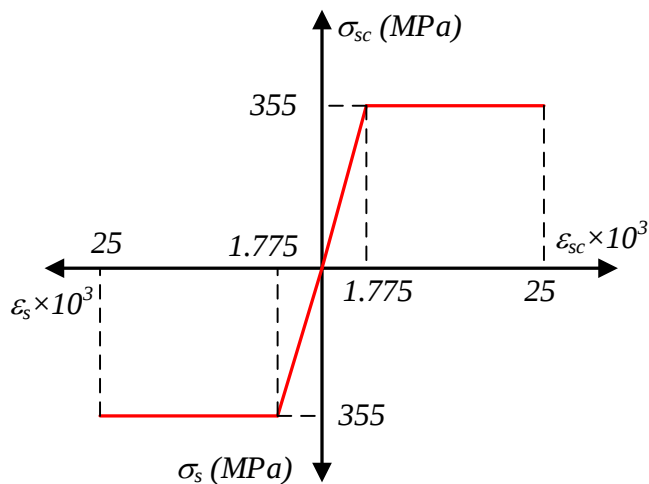


Рис. 6. Диаграммы состояния арматуры класса А400

Продольная арматура класса А400: $R_s = 355$ МПа, $R_{sc} = 355$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Поперечное сечение 570×450 мм, длина ригеля 5400 мм (рис. 7). В сечении действует изгибающий момент, равный $M = 430 \cdot 10^6$ Нмм.

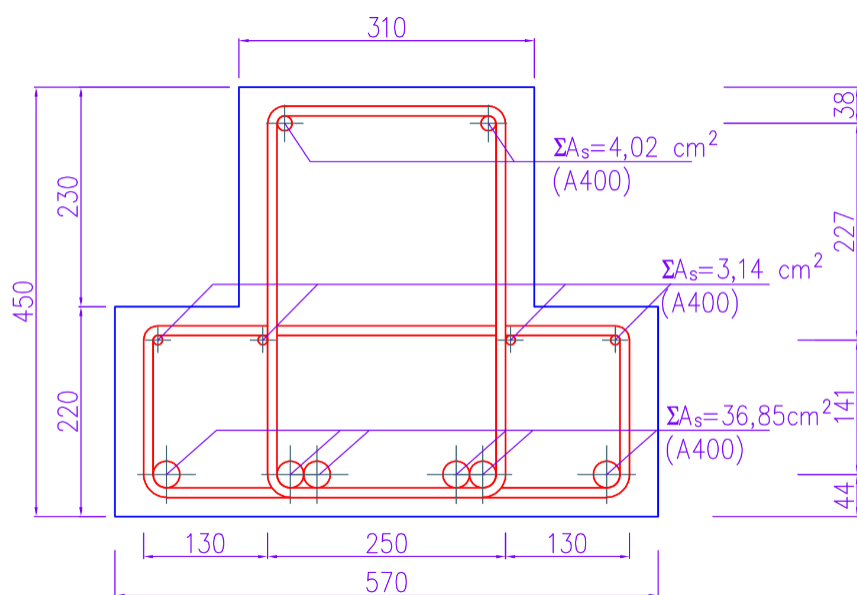


Рис. 7. Поперечное сечение ригеля

Аналитические расчеты проводились с использованием программы Matlab, полученные результаты которых представлены на рис. 11–18.

На рис. 8 представлены исходные данные для примера.

$$M \text{ (N.mm)} = 430000000.000$$

Class concrete: B40

Rb (MPa)	Rbt (MPa)	Eb (MPa)
22.000	1.400	36000.000

Class stell: A-III

Rs (MPa)	Rst (MPa)	Es (MPa)
355.000	355.000	200000.000

Рис. 8. Исходные данные материала и значение момента

Перед началом итерационных расчетов предварительно необходимо произвольно сделать разбивку поперечного сечения на элементарные малые участки. В нашем случае количество малых участков поперечного сечения составило 13 (рис. 9).

На рис. 10 представлены количество слоев и расчетные параметры поперечного сечения ригеля.

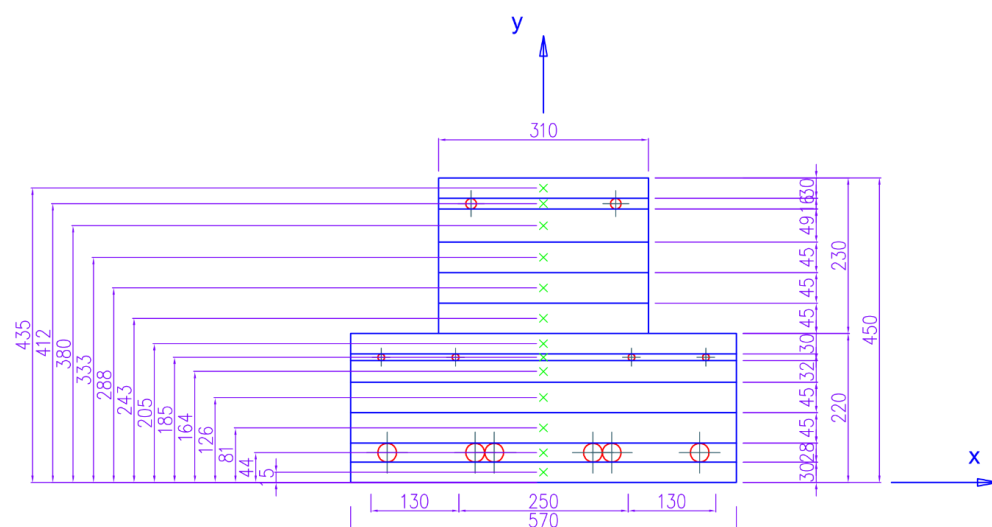


Рис. 9. Разбивка поперечного сечения

Parameters of section layers						
i	delta_bi (mm)	bbi (mm)	yb(i) (mm)	Abi (mm ²)	ysi (mm)	Asi (mm ²)
1.0	30.000	570.000	15.000	17100.000	0.000	0.000
2.0	28.000	570.000	44.000	12275.000	44.000	3685.000
3.0	45.000	570.000	80.500	25650.000	0.000	0.000
4.0	45.000	570.000	125.500	25650.000	0.000	0.000
5.0	32.000	570.000	164.000	18240.000	0.000	0.000
6.0	10.000	570.000	185.000	5386.000	185.000	314.000
7.0	30.000	570.000	205.000	17100.000	0.000	0.000
8.0	45.000	310.000	242.500	13950.000	0.000	0.000
9.0	45.000	310.000	287.500	13950.000	0.000	0.000
10.0	45.000	310.000	332.500	13950.000	0.000	0.000
11.0	49.000	310.000	379.500	15190.000	0.000	0.000
12.0	16.000	310.000	412.000	4558.000	412.000	402.000
13.0	30.000	310.000	435.000	9300.000	0.000	0.000

Рис. 10. Основные параметры слоев по сечению:

i – порядковый номер малого участка; δ_{bi} , $y_b(i)$, b_{bi} , A_{bi} – соответственно высота, расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести, ширина и площадь; y_{si} , A_{si} – соответственно расстояние от внешнего края нижней пристройки до центра тяжести и площадь арматуры

С целью сокращения объема статьи ниже приводятся только первая, вторая и последняя итерации (рис. 11–16).

3. Результаты

3.1. Пример расчета по первому методу M_1

Приведены: j – итерация; $ynl(1, j)$ – расстояние от нейтральной оси до крайнего края растянутой зоны сечения; $a = 1/r$ – расчётная кривизна; δ – относительное отклонение кривизны; $\epsilon_b(i, j)$, $\sigma_b(i, j)$, $E_{ph_b}(i, j)$ – соответственно значения деформаций, напряжений и модуля бетона i -го слоя при j -й итерации; $\epsilon_{b_{calc}}(i, j)$, $\sigma_{b_{calc}}(i, j)$ – соответственно расчетные значения деформаций, напряжений бетона i -го слоя при j -й итерации; $\epsilon_s(i, j)$, $\sigma_s(i, j)$, $E_{ph_s}(i, j)$ – соответственно значения деформаций, напряжений и мо-

дуля арматуры i -го слоя при j -й итерации; $eps_scal(i, j)$, $sig_scal(i, j)$ – соответственно расчетные значения деформаций, напряжений арматуры i -го слоя при j -й итерации; $Mscal$ – расчетный момент.

а) Первая итерация

На рис. 11 и 12 представлены первая итерация и эпюры деформаций и напряжений в поперечном сечении.

j =	1.0						
ynl(1,j) =	180.109						
a = 1/r =	0.000003881950						
delta =	0.010000000000						
i	yh(i) (mm)	eps_b(i,j)	sig_b(i,j) (N/mm2)	Eph_b(i,j) (N/mm2)	eps_s(i,j)	sig_s(i,j) (N/mm2)	Eph_s(i,j) (N/mm2)
1.0	15.000	0.000640944909	0.000	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
2.0	44.000	0.000528368369	0.000	30600.000	0.000528368369	105.674	200000.000
3.0	80.500	0.000386677205	0.000	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
4.0	125.500	0.000211989470	0.000	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
5.0	164.000	0.000062534408	1.094	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
6.0	185.000	-0.000018986536	-0.278	30600.000	-0.000018986536	-3.797	200000.000
7.0	205.000	-0.000096625529	-1.417	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
8.0	242.500	-0.000242198642	-3.552	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
9.0	287.500	-0.000416886377	-6.114	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
10.0	332.500	-0.000591574113	-8.676	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
11.0	379.500	-0.000774025748	-11.352	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
12.0	412.000	-0.000900189112	-13.203	30600.000	-0.000900189112	-180.038	200000.000
13.0	435.000	-0.000989473955	-14.512	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000

Рис. 11. Первая итерация

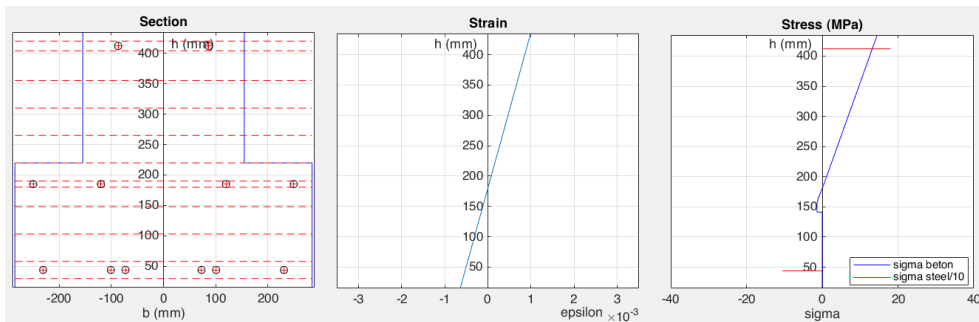


Рис. 12. Эпюры деформаций и напряжений в поперечном сечении первой итерации

б) Вторая итерация

На рис. 13 и 14 представлены результаты второй итерации.

j =	2.0						
ynl(1,j) =	211.535						
a = 1/r =	0.000009576264						
delta =	1.466869614156						
i	yh(i) (mm)	eps_b(i,j)	sig_b(i,j) (N/mm2)	Eph_b(i,j) (N/mm2)	eps_s(i,j)	sig_s(i,j) (N/mm2)	Eph_s(i,j) (N/mm2)
1.0	15.000	0.001882067049	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
2.0	44.000	0.001604355402	0.000	0.000	0.001604355402	320.871	200000.000
3.0	80.500	0.001254821777	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
4.0	125.500	0.000823889911	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
5.0	164.000	0.000455203758	0.000	17500.000	0.000000000000	0.000	200000.000
6.0	185.000	0.000254102220	0.000	14666.667	0.000254102220	50.820	200000.000
7.0	205.000	0.000062576947	1.095	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
8.0	242.500	-0.000296532942	-4.349	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
9.0	287.500	-0.000727464809	-10.669	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
10.0	332.500	-0.001158396675	-16.990	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
11.0	379.500	-0.001608481069	-22.000	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
12.0	412.000	-0.001919709639	-22.000	14666.667	-0.001919709639	-355.000	200000.000
13.0	435.000	-0.002139963704	-22.000	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000

Рис. 13. Вторая итерация

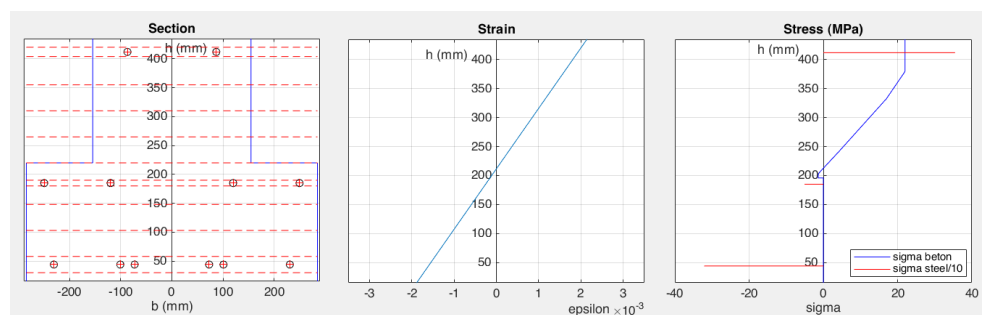


Рис. 14. Эпюра деформаций и напряжений второй итерации

с) Двадцать вторая итерация

На рис. 15 и 16 представлены эпюры деформаций и напряжений двадцать второй итерации.

j =	22.0						
ynl(1,j) =	215.876						
a = 1/r =	0.000013961269						
delta =	0.010557864333						
i	y _b (i) (mm)	eps _b (i,j)	sig _b (i,j) (N/mm ²)	Eph _b (i,j) (N/mm ²)	eps _s (i,j)	sig _s (i,j) (N/mm ²)	Eph _s (i,j) (N/mm ²)
1.0	15.000	0.002804481409	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
2.0	44.000	0.002399604603	0.000	0.000	0.002399604603	355.000	149892.104
3.0	80.500	0.001890018279	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
4.0	125.500	0.001261761166	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
5.0	164.000	0.000724252303	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
6.0	185.000	0.000431065650	0.000	0.000	0.000431065650	86.213	200000.000
7.0	205.000	0.000151840267	0.000	9716.179	0.000000000000	0.000	200000.000
8.0	242.500	-0.000371707327	-5.452	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
9.0	287.500	-0.000999964439	-14.666	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
10.0	332.500	-0.001628221552	-22.000	13602.288	0.000000000000	0.000	200000.000
11.0	379.500	-0.002284401203	-22.000	9705.743	0.000000000000	0.000	200000.000
12.0	412.000	-0.002738142451	-22.000	8101.042	-0.002738142451	-355.000	130721.367
13.0	435.000	-0.003059251642	-22.000	7252.458	0.000000000000	0.000	200000.000
Mcalc (kN.m) =	425.318						
x (mm) =	234.124						

Рис. 15. Двадцать вторая итерация

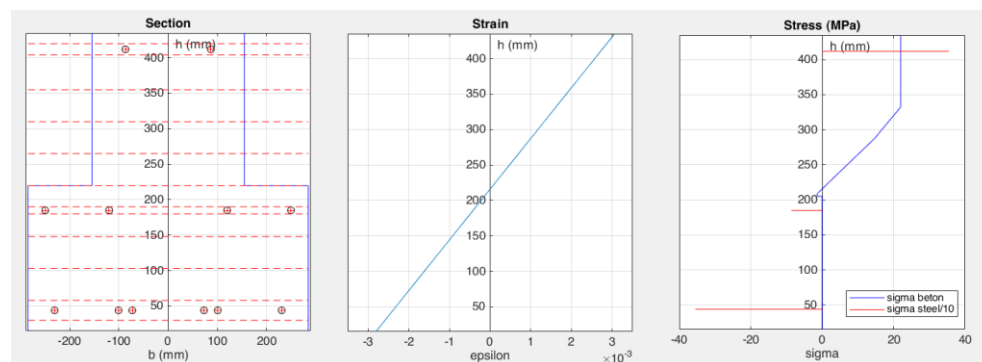


Рис. 16. Эпюры деформаций и напряжений двадцать второй итерации

3.2. Пример расчета по второму методу M₂

В связи с тем, что результаты расчетов второго метода показывают абсолютно такие же численные значения, как и в первом методе, ниже, на

рис. 17 и 18, представлены результаты только первой и последней итераций в табличной форме.

На рис. 17 и 18 представлены первая и двадцать вторая итерации.

j = 1.0 1/r = 0.00003881950 eps_0 = -0.000699174154 delta = 0.01000000000							
i	yh(i) (mm)	esp_b(i,j)	sig_b(i,j) (N/mm2)	Eph_b(i,j) (N/mm2)	esp_s(i,j)	sig_s(i,j) (N/mm2)	Eph_s(i,j) (N/mm2)
1.0	15.000	0.000640944909	0.000	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
2.0	44.000	0.000528368369	0.000	30600.000	0.000528368369	105.674	200000.000
3.0	80.500	0.000386677205	0.000	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
4.0	125.500	0.000211989470	0.000	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
5.0	164.000	0.000062534408	1.094	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
6.0	185.000	-0.000018986536	-0.278	30600.000	-0.000018986536	-3.797	200000.000
7.0	205.000	-0.000096625529	-1.417	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
8.0	242.500	-0.000242198642	-3.552	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
9.0	287.500	-0.000416886377	-6.114	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
10.0	332.500	-0.000591574113	-8.676	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
11.0	379.500	-0.000774025748	-11.352	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000
12.0	412.000	-0.000900189112	-13.203	30600.000	-0.000900189112	-180.038	200000.000
13.0	435.000	-0.000989473955	-14.512	30600.000	0.000000000000	0.000	200000.000

Рис. 17. Первая итерация

j = 22.0 1/r = 0.000013961269 eps_0 = -0.003013900447 delta = 0.010557864333							
i	yb(i) (mm)	eps_b(i,j)	sig_b(i,j) (N/mm2)	Eph_b(i,j) (N/mm2)	eps_s(i,j)	sig_s(i,j) (N/mm2)	Eph_s(i,j) (N/mm2)
1.0	15.000	0.002804481409	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
2.0	44.000	0.002399604603	0.000	0.000	0.002399604603	355.000	149892.104
3.0	80.500	0.001890018279	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
4.0	125.500	0.001261761166	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
5.0	164.000	0.000724252303	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
6.0	185.000	0.000431065650	0.000	0.000	0.000431065650	86.213	200000.000
7.0	205.000	0.000151840267	0.000	9716.179	0.000000000000	0.000	200000.000
8.0	242.500	-0.000371707327	-5.452	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
9.0	287.500	-0.000999964439	-14.666	14666.667	0.000000000000	0.000	200000.000
10.0	332.500	-0.001628221552	-22.000	13602.288	0.000000000000	0.000	200000.000
11.0	379.500	-0.002284401203	-22.000	9705.743	0.000000000000	0.000	200000.000
12.0	412.000	-0.002738142451	-22.000	8101.042	-0.002738142451	-355.000	130721.367
13.0	435.000	-0.003059251642	-22.000	7252.458	0.000000000000	0.000	200000.000

Рис. 18. Двадцать вторая итерация

Минимальное относительное отклонение расчётов, равное $\delta = 1,05\%$, показывает двадцать вторая итерация в обоих случаях.

В табл. 3 в зависимости от рис. 15 (метод 1) и 18 (метод 2) представлен деформационный критерий прочности по [23]. Полученные расчетные деформации первого и второго методов показывают абсолютно одинаковые значения.

Таблица 3

Деформации в контролируемых точках

Деформационный критерий прочности в контролируемых точках			
В сжатой зоне $\varepsilon_b(\max)$	$\varepsilon_b \leq [\varepsilon_b] = 3,5 \cdot 10^{-3}$ [23]	В растянутой зоне $\varepsilon_s(\max)$	$\varepsilon_s \leq [\varepsilon_s] = 25 \cdot 10^{-3}$ [23]
$3,059 \cdot 10^{-3}$	Условие выполняется	$2,399 \cdot 10^{-3}$	Условие выполняется

4. Сравнительный расчет предлагаемой методики с зарубежными стандартами

Для оценки возможностей предложенных деформационных методов ниже приводится сравнительный расчет с результатами расчетов, выполненных по нормам зарубежных стран. Согласно источнику [18], изгибаемый железобетонный элемент представляет собой балку типа SS, армированную нержавеющей арматурной сталью класса 1.4311 (304LN) с геометрическими размерами 150×280×2950 (рис. 19). Рассмотрены элементы с классом бетона С30 (В30). Арматурные стержни принимаются 2φ12 ($A_s = 226,08 \text{ мм}^2$) и на сжатие 2φ8 ($A_s = 100,48 \text{ мм}^2$) с расчетным сопротивлением $R_s = 480 \text{ МПа}$ (условный предел текучести). Расстояние от краевой поверхности балки до центра тяжести натянутой арматуры $a' = 29 \text{ мм}$.

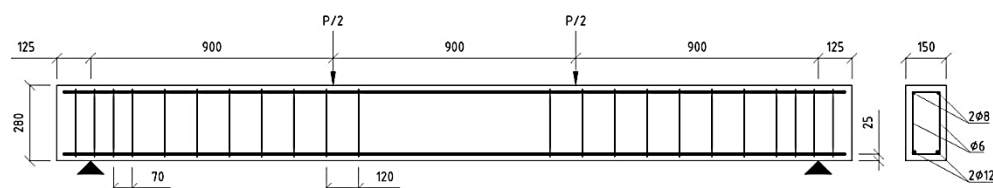


Рис. 19. Железобетонная балка (304LN)

Согласно пункту 8.1.9 в работе [23], в случае $\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_R$ предельный момент M_{LS} определяется по формуле

$$M_{LS} = R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0,5 \cdot x) + R_{sc} \cdot A'_s (h_0 - a'); \\ x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b}.$$

Соответственно для балок из бетона В30:

- высота сжатой зоны: 23,64 мм;
- предельный момент: $M_{LS} = 24,91 \text{ кН·м}$.

На рис. 20 представлены количество слоев и расчетные параметры поперечного сечения железобетонной балки.

Parameters of section layers						
i	delta_bi (mm)	bbi (mm)	ybi(i) (mm)	Abi (mm ²)	ysi (mm)	Asi (mm ²)
1.0	25.000	150.000	12.500	3750.000	0.000	0.000
2.0	12.000	150.000	31.000	1573.920	31.000	226.080
3.0	35.000	150.000	54.500	5250.000	0.000	0.000
4.0	35.000	150.000	89.500	5250.000	0.000	0.000
5.0	35.000	150.000	124.500	5250.000	0.000	0.000
6.0	35.000	150.000	159.500	5250.000	0.000	0.000
7.0	35.000	150.000	194.500	5250.000	0.000	0.000
8.0	35.000	150.000	229.500	5250.000	0.000	0.000
9.0	8.000	150.000	251.000	1099.520	251.000	100.480
10.0	25.000	150.000	267.500	3750.000	0.000	0.000

Рис. 20. Расчетные параметры поперечного сечения балки

а) На рис. 21 и 22 представлена последняя 54-я итерация первого метода, при котором относительное отклонение составило $\delta = 0,99\%$.

j =	54.0						
ynl(i,j) =	223.542						
a = 1/r =	0.000036440877						
delta =	0.009941508907						
i	yb(i) (mm)	eps_bcalc	sig_bcalc (N/mm2)	Eph_b(i,j) (N/mm2)	eps_scalc	sig_scalc (N/mm2)	Eph_s(i,j) (N/mm2)
1.0	12.500	0.007690560189	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
2.0	31.000	0.007016403958	0.000	0.000	0.007016403958	480.000	69140.936
3.0	54.500	0.006160043340	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
4.0	89.500	0.004884612632	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
5.0	124.500	0.003609181925	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
6.0	159.500	0.002333751217	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
7.0	194.500	0.001058320510	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
8.0	229.500	-0.000217110198	-2.461	11333.333	0.000000000000	0.000	200000.000
9.0	251.000	-0.001000589061	-11.340	11333.333	-0.001000589061	-200.118	200000.000
10.0	267.500	-0.001601863537	-17.000	10684.495	0.000000000000	0.000	200000.000
Mcalc (kN.m) =	24.668						
x (mm) =	56.458						

Рис. 21. Деформации и напряжения

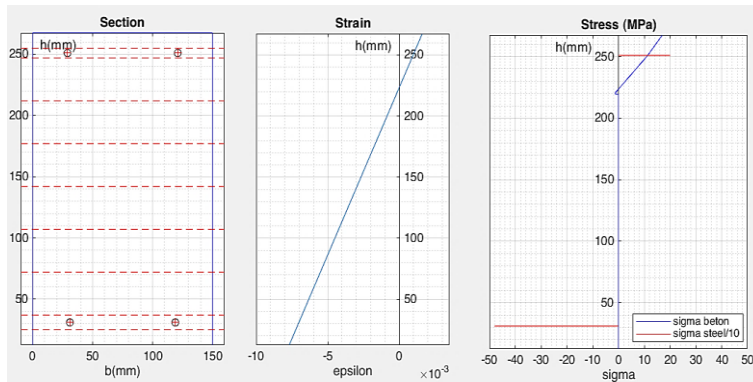


Рис. 22. Эпюры деформаций и напряжений

б) На рис. 23 и 24 представлены результаты расчётов второго метода.

j =	54.0						
1/r =	0.000036440877						
eps_0 =	-0.008146071156						
delta =	0.009941508907						
i	yb(i) (mm)	eps_bcalc	sig_bcalc (N/mm2)	Eph_b(i,j) (N/mm2)	eps_scalc	sig_scalc (N/mm2)	Eph_s(i,j) (N/mm2)
1.0	12.500	0.007690560189	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
2.0	31.000	0.007016403958	0.000	0.000	0.007016403958	480.000	69140.936
3.0	54.500	0.006160043340	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
4.0	89.500	0.004884612632	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
5.0	124.500	0.003609181925	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
6.0	159.500	0.002333751217	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
7.0	194.500	0.001058320510	0.000	0.000	0.000000000000	0.000	200000.000
8.0	229.500	-0.000217110198	-2.461	11333.333	0.000000000000	0.000	200000.000
9.0	251.000	-0.001000589061	-11.340	11333.333	-0.001000589061	-200.118	200000.000
10.0	267.500	-0.001601863537	-17.000	10684.495	0.000000000000	0.000	200000.000

Рис. 23. Результаты расчета

Полученные численные значения деформаций и напряжений в обоих методах абсолютно одинаковы, и коэффициент отклонения составляет $\delta = 0,99\%$.

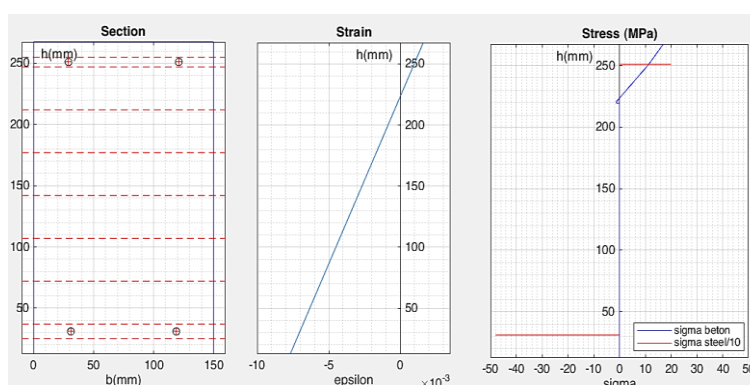


Рис. 24. Эпюры деформаций и напряжений

с) Сравнение результатов расчета изгибаемой балки 1.4311 (304LN) методами № 1 и № 2.

В табл. 4 в зависимости от рис. 21 (метод 1) и 23 (метод 2) представлен деформационный критерий прочности. Полученные расчетные деформации первого и второго методов показывают абсолютно одинаковые значения.

Таблица 4

Деформации в контролируемых точках

Деформационный критерий прочности в контролируемых точках			
В сжатой зоне $\varepsilon_b (\max)$	$\varepsilon_b \leq [\varepsilon_b] = 3,5 \cdot 10^{-3}$ [23]	В растянутой зоне $\varepsilon_s (\max)$	$\varepsilon_s \leq [\varepsilon_s] = 25 \cdot 10^{-3}$ [23]
$1,602 \cdot 10^{-3}$	Условие выполняется	$7,016 \cdot 10^{-3}$	Условие выполняется

В табл. 5 приведены сравнения изгибающих моментов.

Таблица 5

Изгибающие моменты

Results according to [18] table 4				[23]	DM	M_{EC2}/M_1 (%)	M_{AM}/M_1 (%)	M_{FE}/M_1 (%)	M_{SM}/M_1 (%)
M_{EC2} (кН·м)	M_{AM} (кН·м)	M_{FE} (кН·м)	M_{SM} (кН·м)	M_{LS} (кН·м)	$M_1 = M_2$ (кН·м)				
26,15	31,95	39,56	30,20	24,91	24,668	6,01	29,45	60,37	22,43

Здесь M_{EC2} – момент по Еврокод-2; M_{AM} – полный аналитический момент; M_{FE} – численный момент Abaqus; M_{SM} – упрощенный аналитический момент; M_{LS} – предельный момент по СП 63.13330.2018; DM – деформационная модель; M_1, M_2 – методы 1 и 2.

Численные значения моментов согласно [18], представленные в табл. 5, показывают хорошую сходимость деформационных методов (M_1, M_2) с результатами расчётов по Еврокод-2 (M_{EC2}), и погрешность составляет порядка 6 %.

Достаточно большое расхождение (60 %) между методами M_1 , M_2 , M_{EC2} и Abaqus объясняется с тем, что в первом случае использовано расчетное сопротивление стали $\sigma_{0,2}$, а во втором в численном методе – предельное сопротивление σ_u .

При этом, согласно напряженно-деформированному состоянию, представленному на рис. 23 и 24, экспериментальная балка 1.4311 (304LN) по [18] проектирована неэффективно, т. к. высота сжатой зоны достаточно мала, а значит, и жесткость недостаточна.

Выводы

По результатам предложенных методов аналитического расчета с использованием программного комплекса Matlab можно сделать следующие выводы:

1. Применение полученных алгоритмов эффективно при проверке надежности проектных расчетов, в том числе при проектировании зданий и сооружений с заранее известными расчетными параметрами (класс бетона, арматура, геометрические характеристики, усилия) элементов конструкций из комбинированных строительных материалов.

2. Предложенные методы применимы к поперечному сечению балки «Т-образной» и прямоугольной балки и могут быть адаптированы для более сложных форм поперечного сечения.

3. Окончательные результаты сохраняются в виде таблиц и графически отображаются в рабочем пространстве программного пакета Matlab, что обеспечивает взаимодействие с другими текстовыми редакторами.

4. Эти методы практичны и обладают достаточно высокой скоростью вычислений за счет использования матричной записи систем уравнений.

5. Представленные две модели деформации дают идентичные численные результаты, которые показывают адекватность методов.

6. Метод 1 имеет преимущества перед методом 2, т. к. в первом случае легко определить положение нейтральной линии и высоту сжатой зоны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Michał D., Jacek Ś. Design Aspects of the Safe Structuring of Reinforcement in Reinforced Concrete Bending Beams // Procedia Engineering. 2017. V. 172. P. 211–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
2. Herranz J.P., Maria H.S., Gutiérrez S., Riddell R. Optimal Strut-and-tie models using full homogenization optimization method // ACI Structural Journal. 2012. V. 109(5). P. 605–613. DOI:10.14359/51684038
3. Garstecki A., Glema A., Ścigallo J. Optimal design of reinforced concrete beams and frames // Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. 1996. V. 3 (3). P. 223–231.
4. Amin A., Gilbert R.I. Instantaneous Crack Width Calculation for Steel Fiber-Reinforced Concrete Flexural Members // Aci Structural Journal. 2018. V. 115. № 2. P. 535–542. DOI:10.14359/51701116
5. Szeptyński P. Comparison and experimental verification of simplified one-dimensional linear elastic models of multilayer sandwich beams // Composite Structures. 2020. V. 214. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112088
6. Gao D.Y., Gu Z. qiang, Wu C. Bending Behavior and Deflection Prediction of High-Strength SFRC Beams under Fatigue Loading // Journal of Materials Research and Technology. 2020. V. 9. P. 6143–6159. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.017

7. Wu Z., Shi C., He W., Wu L. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high-performance concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 103. P. 8–14. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028
8. Yoo D.Y., Banthia N., Yoon Y.S. Impact resistance of reinforced ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers // *ACI Structural Journal*. 2017. V. 114 (1). P. 113–124. DOI:10.14359/51689430
9. Ulzurrin G.S.D., Zanuy C. Enhancement of impact performance of reinforced concrete beams without stirrups by adding steel fibers // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 145. P. 166–182. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.005
10. Gali S., Subramaniam K.V.L. Investigation of the dilatant behavior of cracks in the shear response of steel fiber reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2017. V. 152. P. 832–842. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.09.050
11. Li Q., Huang B., Xu S., Zhou B., Yu R.C. Compressive fatigue damage and failure mechanism of fiber reinforced cementitious material with high ductility // *Cement and Concrete Research*. 2016. V. 90. P. 174–183. DOI:10.1016/j.cemconres.2016.09.019
12. Butean C., Heghes B. Cost Efficiency of a Two Layer Reinforced Concrete Beam // *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 46. P. 103–109. DOI:10.1016/j.promfg.2020.03.016
13. Glowacki M., Kowalski R. An experimental approach to the estimation of stiffness changes in RC elements exposed to bending and high temperature // *Engineering Structures*. 2020. V. 217. P. 1–15. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110720
14. Zhu H., Cheng S., Gao D., Neaz S.M., Li C. Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 161. Pp. 587–597. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.003
15. Song A., Wan S., Jiang Z., Xu J. Residual deflection analysis in negative moment regions of steel-concrete composite beams under fatigue loading // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 158. P. 50–60. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.075
16. Fava G., Carvelli V., Pisani M.A. Remarks on bond of GFRP rebars and concrete // *Composites Part B: Engineering*. 2016. V. 93. P. 210–220. DOI:10.1016/j.compositesb.2016.03.012
17. Aulia T.B., Rinaldi. Bending capacity analysis of high-strength reinforced concrete beams using environmentally friendly synthetic fiber composites // *Procedia Engineering*. 2015. V. 125. P. 1121–1128. DOI:10.1016/j.proeng.2015.11.136
18. Rabi M., Cashell K.A., Shamass R. Flexural analysis and design of stainless steel reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2019. V. 198. P. 1–13. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109432
19. Cramer S.D., Covino B.S., Bullard S.J., Holcomb G.R., Russell J.H., Nelson F.J., Laylor H.M., Soltesz S.M. Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges // *Cement and Concrete Composites*. 2002. V. 24. P. 101–117. DOI:10.1016/S0958-9465(01)00031-2
20. Briz E., Biezma M.V., Bastidas D.M. Stress corrosion cracking of new 2001 lean-duplex stainless steel reinforcements in chloride contained concrete pore solution: An electrochemical study // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 192. P. 1–8. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.108
21. Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S.M., Elwany A., Bian L. Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel // *International Journal of Fatigue*. 2017. V. 94. P. 218–235. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2016.03.014
22. Hou Z., Chen S., Sun Q., Wei X., Lv W. Experimental research on fatigue characteristics of X12Cr13 stainless steel // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V. 9. P. 3230–3240. DOI:10.1016/j.jmrt.2020.01.070
23. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Vedernikova A.A. Calculation of Bending of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Members by a Nonlinear Deformation Model with the Use of Iteration Procedures // *Mechanics of Composite Materials*. 2018. V. 54 № 5. P. 1–24. DOI:10.1007/s11029-018-9769-x
24. Опбул Э.К., Ондар Э.Э., Калдар-оол А-Х.Б. Расчет прочности фиброжелезобетонныхгибаемых элементов с использованием трехлинейной диаграммы деформирования растянутой зоны // *Научное обозрение*. 2016. № 14. С. 100–106.

25. *Онбул Э.К., Ондар Э.Э., Калдар-оол А.-Х.Б.* Деформационные модели расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов // Вестник Туvinского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2020. № 1 (58). С. 6–22.
26. *Онбул Э.К., Калдар-оол А.Х.Б.* Практическое применение нелинейной деформационной модели в расчёте коротких железобетонных элементов, находящихся в косом внецентренном сжатии // Вестник Туvinского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2022. № 1 (90). С. 34–48.
27. *Munshi J.A.* Design of prestressed flexural sections by the Unified Design Approach // *PCI Journal*. 1999. V. 46. P. 76–87. DOI:10.15554/pci.09011999.72.81
28. *Orozco C.E.* Strain limits vs. reinforcement ratio limits - A collection of new and old formulas for the design of reinforced concrete sections // *Case Studies in Structural Engineering*. 2015. V. 4. P. 1–13. DOI:10.1016/j.csse.2015.05.001
29. *ACI 318.* Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11). 2011. ISBN:9780870312649.
30. *Panfilov D.A., Pischulev A.A., Romanchkov V.V.* The Methodology for Calculating Deflections of Statically Indeterminate Reinforced Concrete Beams (Based on Nonlinear Deformation Model) // *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. P. 531–536. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.183
31. *Gilbert R.I.* The serviceability limit states in reinforced concrete design // *Procedia Engineering*. 2011. V. 14. P. 385–395. DOI:10.1016/j.proeng.2011.07.048
32. *Wróblewski R., Ignatowicz R., Gierczak J.* Influence of Shrinkage and Temperature on a Composite Pretensioned - Reinforced Concrete Structure // *Procedia Engineering*. 2017. V. 193. P. 96–103. DOI:10.1016/j.proeng.2017.06.191

REFERENCES

1. *Michał D., Jacek Ś.* Design aspects of the safe structuring of reinforcement in reinforced concrete bending beams. *Procedia Engineering*. 2017. V. 172. Pp. 211–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
2. *Herranz J.P., Maria H.S., Gutiérrez S., Riddell R.* Optimal strut-and-tie models using full homogenization optimization method. *ACI Structural Journal*. 2012. V. 109. No. 5. Pp. 605–613. DOI:10.14359/51684038
3. *Garstecki A., Glema A., Ścigallo J.* Optimal design of reinforced concrete beams and frames. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*. 1996. V. 3. No. 3. Pp. 223–231.
4. *Amin A., Gilbert R.I.* Instantaneous crack width calculation for steel fiber-reinforced concrete flexural members. *ACI Structural Journal*. 2018. V. 115. No. 2. Pp. 535–542. DOI:10.14359/51701116
5. *Szeptyński P.* Comparison and experimental verification of simplified one-dimensional linear elastic models of multilayer sandwich beams. *Composite Structures*. 2020. V. 214. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112088
6. *Gao D.Y., Gu Z. Qiang, Wu C.* Bending behavior and deflection prediction of high-strength SFRC beams under fatigue loading. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V. 9. Pp. 6143–6159. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.017
7. *Wu Z., Shi C., He W., Wu L.* Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high-performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. V. 103. Pp. 8–14. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028
8. *Yoo D.Y., Banthia N., Yoon Y.S.* Impact resistance of reinforced ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *ACI Structural Journal*. 2017. V. 114 No. 1. Pp. 113–124. DOI:10.14359/51689430
9. *Ulzurrún G.S.D., Zanuy C.* Enhancement of impact performance of reinforced concrete beams without stirrups by adding steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2017. V. 145. Pp. 166–182. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.005
10. *Gali S., Subramaniam K.V.L.* Investigation of the dilatant behavior of cracks in the shear response of steel fiber reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 2017. V. 152. Pp. 832–842. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.09.050

11. Li Q., Huang B., Xu S., Zhou B., Yu R.C. Compressive fatigue damage and failure mechanism of fiber reinforced cementitious material with high ductility. *Cement and Concrete Research*. 2016. V. 90. Pp. 174–183. DOI:10.1016/j.cemconres.2016.09.019
12. Butean C., Heghes B. Cost Efficiency of a two layer reinforced concrete beam. *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 46. Pp. 103–109. DOI:10.1016/j.promfg.2020.03.016
13. Glowacki M., Kowalski R. An experimental approach to the estimation of stiffness changes in RC elements exposed to bending and high temperature. *Engineering Structures*. 2020. V. 217. Pp. 1–15. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110720
14. Zhu H., Cheng S., Gao D., Neaz S.M., Li C. Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*. 2018. V. 161. Pp. 587–597. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.003
15. Song A., Wan S., Jiang Z., Xu J. Residual deflection analysis in negative moment regions of steel-concrete composite beams under fatigue loading. *Construction and Building Materials*. 2018. V. 158. Pp. 50–60. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.075
16. Fava G., Carvelli V., Pisani M.A. Remarks on bond of GFRP rebars and concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2016. V. 93. Pp. 210–220. DOI:10.1016/j.compositesb.2016.03.012
17. Aulia T.B., Rinaldi. Bending capacity analysis of high-strength reinforced concrete beams using environmentally friendly synthetic fiber composites. *Procedia Engineering*. 2015. V. 125. Pp. 1121–1128. DOI:10.1016/j.proeng.2015.11.136
18. Rabi M., Cashell K.A., Shamass R. Flexural analysis and design of stainless steel reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 2019. V. 198. Pp. 1–13. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109432
19. Cramer S.D., Covino B.S., Bullard S.J., Holcomb G.R., Russell J.H., Nelson F.J., Laylor H.M., Soltesz S.M. Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. *Cement and Concrete Composites*. 2002. V. 24. Pp. 101–117. DOI:10.1016/S0958-9465(01)00031-2
20. Briz E., Biezma M.V., Bastidas D.M. Stress corrosion cracking of new 2001 lean-duplex stainless steel reinforcements in chloride contained concrete pore solution: An electrochemical study. *Construction and Building Materials*. 2018. V. 192. Pp. 1–8. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.108
21. Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S.M., Elwany A., Bian L. Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *International Journal of Fatigue*. 2017. V. 94. Pp. 218–235. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2016.03.014
22. Hou Z., Chen S., Sun Q., Wei X., Lv W. Experimental research on fatigue characteristics of X12Cr13 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V. 9. Pp. 3230–3240. DOI:10.1016/j.jmrt.2020.01.070
23. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Vedernikova A.A. Calculation of bending of steel-fiber-reinforced concrete members by a nonlinear deformation model with the use of iteration procedures. *Mechanics of Composite Materials*. 2018. V. 54 No. 5. Pp. 1–24. DOI:10.1007/s11029-018-9769-x
24. Opbul E.K., Ondar E.E., Kaldar-ool A-Kh.B. Raschet prochnosti fibrozhelezobetonnykh iz-gibaemykh elementov s ispol'zovaniem trekhlineinoy diagrammy deformirovaniya rastyanutoi zony [Strength analysis of fiber-reinforced concrete bending elements using three-line stress-strain diagram of tension region]. *Nauchnoe obozrenie*. 2016. No. 14. Pp. 100–106. (rus)
25. Opbul E.K., Ondar E.E., Kaldar-ool A-Kh.B. Deformatsionnye modeli rascheta prochnosti iz-gibaemykh zhelezobetonnykh elementov [Deformation models of strength of bending steel elements]. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2020. No. 1 (58). Pp. 6–22. (rus)
26. Opbul E.K., Kaldar-ool A.Kh.B. Prakticheskoe primeneniye nelineinoy deformatsionnoy modeli v raschete korotkikh zhelezobetonnykh elementov, nakhodyashchikhsya v kosom vnetsentrennom szhatii [Application of nonlinear deformation model for strength analysis of short reinforced concrete elements under oblique eccentric compression]. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2022. No. 1 (90). Pp. 34–48. (rus)
27. Munshi J.A. Design of prestressed flexural sections by the unified design approach. *PCI Journal*. 1999. V. 46. Pp. 76–87. DOI:10.15554/pci.09011999.72.81

28. Orozco C.E. Strain limits vs. reinforcement ratio limits – A collection of new and old formulas for the design of reinforced concrete sections. *Case Studies in Structural Engineering*. 2015. V. 4. Pp. 1–13. DOI:10.1016/j.csse.2015.05.001
29. ACI 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11). 2011. ISBN:9780870312649.
30. Panfilov D.A., Pischulev A.A., Romanchkov V.V. The methodology for calculating deflections of statically indeterminate reinforced concrete beams (based on nonlinear deformation model). *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. Pp. 531–536. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.183
31. Gilbert R.I. The serviceability limit states in reinforced concrete design. *Procedia Engineering*. 2011. V. 14. Pp. 385–395. DOI:10.1016/j.proeng.2011.07.048
32. Wróblewski R., Ignatowicz R., Gierczak J. Influence of shrinkage and temperature on a composite pretensioned - Reinforced concrete structure. *Procedia Engineering*. 2017. V. 193. Pp. 96–103. DOI:10.1016/j.proeng.2017.06.191

Сведения об авторах

Опбул Эрес Кечил-оолович, канд. техн. наук, зав. лабораторией, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, fduenufce@mail.ru

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

Ле Куанг Хюу, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, lqh189@lqdtu.edu.vn

Authors Details

Eres K. Opbul, PhD, Laboratory Head, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, fduenufce@mail.ru

Anai-Khaak B. Kaldar-ool, PhD, Senoir Lecturer, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Russia, oorzhaka-h@mail.ru

Le Quang Huy, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, lqh189@lqdtu.edu.vn

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 666.3-1

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-130-138

В.В. ШЕХОВЦОВ, Н.К. СКРИПНИКОВА,

Р.Е. ГАФАРОВ, О.Г. ВОЛОКИТИН,

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА МУЛЛИТОВОЙ КЕРАМИКИ В СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ*

Аннотация. Муллит обладает низким коэффициентом теплового расширения, теплопроводностью и отличной стойкостью к тепловому удару и поэтому играет важную роль при синтезе современных керамических материалов. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по синтезу муллитовой керамики в среде термической плазмы. Получение образцов производилось из природного сырья бёмита $\gamma\text{-AlO(OH)}$ и кварцевого песка SiO_2 в стехиометрическом соотношении $N = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = 1,86; 3; 5,67$.

Установлено, что оптимальным режимом работы электродугового плазмотрона при синтезе муллитосодержащих образцов из шихты массой 8 г является: сила тока 80 А, напряжение 100 В и время воздействия плазменного потока 60 с. При таких технологических параметрах формируется продукт плавления в виде полусферы (диаметр 23 мм, толщина 11 мм), что указывает на факт полного перехода исходных компонентов в расплавленное состояние.

Синтезированные керамические образцы характеризуются кристаллической фазой муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$. При этом для $N = 1,86$ присутствуют скрытокристаллические дифракционные максимумы в районе $2\theta = 53\text{--}54^\circ$ и $69\text{--}76^\circ$, что обусловлено повышенным содержанием SiO_2 . Проведенные морфологические исследования для $N = 3$, являющегося традиционным стехиометрическим соотношением получения муллитовой фазы, показали, что матрица синтезируемого образца представлена аморфной фазой, пронизанной нитевидными монокристаллами муллита со средней длиной волокон 3,3 мкм и толщиной 0,86 мкм. Результаты рентгенофазового анализа установлено, что переходный слой между данными фазами имеет стеклокристаллическую структуру.

Ключевые слова: керамика, муллит, термическая плазма, бёмит, кварцевый песок

Для цитирования: Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Гафаров Р.Е., Волокитин О.Г. Оптимизация процесса синтеза муллитовой керамики в среде тер-

* Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001.

мической плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 130–138.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-130-138

V.V. SHEKHOVTSOV, N.K. SKRIPNIKOVA,
R.E. GAFAROV, O.G. VOLOKITIN,
Tomsk State University of Architecture and Building

OPTIMIZED SYNTHESIS OF MULLITE CERAMICS IN THERMAL PLASMA

Abstract. Mullite has low thermal expansion coefficient, thermal conductivity and excellent resistance to thermal shock, and plays therefore an important role in the synthesis of modern ceramic materials. The paper presents the experimental results of mullite ceramics synthesis using thermal plasma. The ceramic samples are obtained from natural raw materials such as boehmite and silica sand in the stoichiometric $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio of 1.86, 3 and 5.67.

It is shown that the optimal operation mode of the arc plasma torch in the synthesis of mullite-containing samples from an 8 g charge weighing includes 80 A current, 100 V voltage, and 60 s exposure time. With such technological parameters, the melting product is a hemisphere with diameter 23 mm and thickness 11 mm, which indicates to a complete transition of the initial components to the molten state.

The synthesized ceramic samples are characterized by the crystalline phase of mullite $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. At the same time, at the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio of 1.86, cryptocrystalline diffraction maxima are observed at $2\theta = 53\text{--}54^\circ$ and $69\text{--}76^\circ$ due to the increased content of SiO_2 . According to morphological studies performed for the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio of 3, which is the traditional stoichiometric ratio for the mullite phase synthesis, the matrix of the synthesized sample is represented by the amorphous phase penetrated by filamentary single crystals of mullite with the average length of 3.3 μm and 0.86 μm thickness. It is found that the transition layer between these phases has a glass-ceramic structure, which is consistent with the results of the X-ray phase analysis.

Keywords: ceramics; mullite; thermal plasma; boehmite; silica sand

For citation: Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Gafarov R.E., Volokitin O.G. Optimizatsiya protsessy sinteza mullitovoi keramiki v srede termicheskoi plazmy [Optimized synthesis of mullite ceramics in thermal plasma]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 130–138.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-130-138

Муллит как материал обладает высоким сопротивлением ползучести, хорошей стойкостью к тепловому удару и малым ослаблением прочности при высоких температурах, что привлекает внимание ученых всего мира [1–3]. В последние годы, благодаря непрерывному развитию и совершенствованию промышленных технологий, муллитовые огнеупоры быстро развиваются и широко используются в нефтяной, металлургической, аэрокосмической, химической и других отраслях промышленности. Кроме того, муллитовая керамика также обладает превосходными электрохимическими и оптическими свойствами, такими как широкополосное инфракрасное излучение и радиопрозрачность, что позволяет использовать ее при производстве высокотехнологичного оборудования [4–6]. Однако получение столь полезного материала ослож-

няется высокой температурой начала синтеза муллита ($>1100^\circ\text{C}$, без учета добавок), достижение и поддержание которой является весьма энергозатратным процессом. В работах [7–9] показана возможность применения энергии термической плазмы при плавлении тугоплавкого алюмосиликатного сырья. Так на основе плавления каолиновых глин была получена керамика, которая представляет собой аморфную фазу, пронизанную нитевидными монокристаллами муллита [10]. Однако список публикаций, посвященных синтезу муллита плазменным методом, весьма ограничен. Более того, большинство из них не содержат данных о последовательности технологических процессов и сроках их выполнения. Таким образом, целью настоящей работы является оптимизация процесса синтеза муллитовой керамики из распространенного природного материала методом плазменной плавки шихты и последующего изучения полученного продукта плавления.

В качестве исходного сырья использовались следующие материалы природного происхождения: бёмит (месторождении бокситов, Северный Урал) и мелкозернистый кварцевый песок (песочный карьер, Самарская область). В табл. 1 представлен усредненный оксидный состав материалов, а также различное стехиометрическое соотношение шихты N , полученной на основе данного сырья.

Таблица 1

Усредненный оксидный состав, масс. %

Материалы	Оксид				$N = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$		
	SiO_2	Al_2O_3	X	$\Delta m_{\text{п}}$	1,86	3,0	5,67
Кварцевый песок	96,88	0,93	0,43	1,76	35	25	15
Бёмит	0,03	88,45	0,35	11,2	65	75	85
X – примеси, $\Delta m_{\text{п}}$ – потери при прокаливании							

На рис. 1, а представлена фотография экспериментального стенда, включающего: модифицированный электродуговой плазмотрон для плазменной резки ВПР-410 с диаметром сопла 5 мм (катод), графитовый тигель объемом $55,9\text{ см}^3$ (анод), источник питания CUT 160, а также расположение подготовленной шихты на стенде. На рис. 2, б представлены тренды изменения температуры при различной вкладываемой мощности ($P = 5\text{--}8\text{ кВт}$), установленные методом ИК-пирометрии (Мегеон 162200, Россия). Установлено, что за 30 с работы плазмотрона, в диапазоне вкладываемой мощности $5\text{--}8\text{ кВт}$, графитовый тигель прогревается до температур $1675\text{--}1912^\circ\text{C}$, что обеспечивает температурный диапазон синтеза муллита.

Для оптимизации процесса плавления и отработки технологических режимов проведена серия экспериментов с вариацией времени нагрева и мощности электроплазменного потока. Оценку потери массы от времени нагрева проводили для всей линейки рассматриваемых составов, а отработку энергетических затрат – при классическом стехиометрическом соотношении $N = 3$. Масса подготовленного гранулированного исходного сырья, погружаемого в графитовый тигель, составляла 8 г. На рис. 2 представлены результаты исследований по потере массы в зависимости от N (а) и устанавливаемой мощ-

ности на экспериментальном стенде (б). На рис. 2 также приведены вставки фотографий внешнего вида полученных образцов.

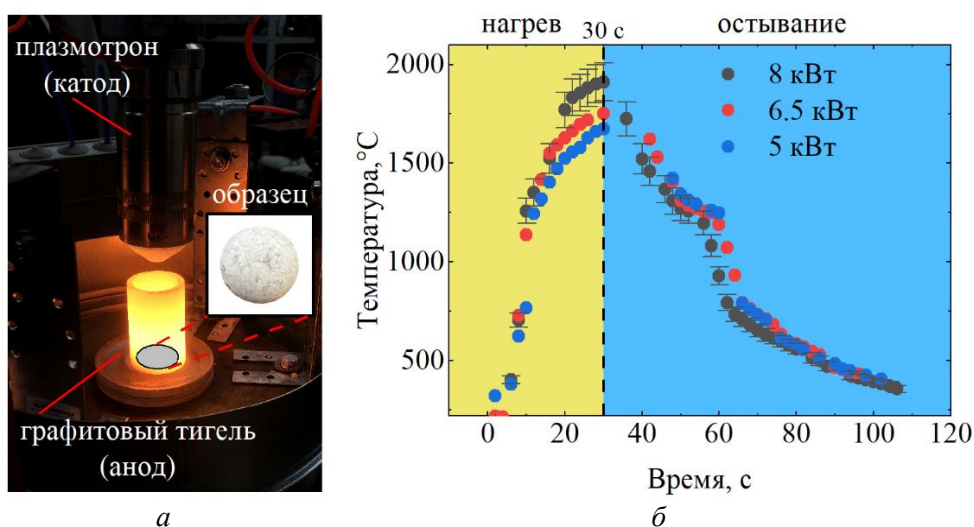


Рис. 1. Фотография процесса синтеза муллитовых образцов (а) и тренды изменения температуры внешней стенки графитового тигля при различной мощности (б)

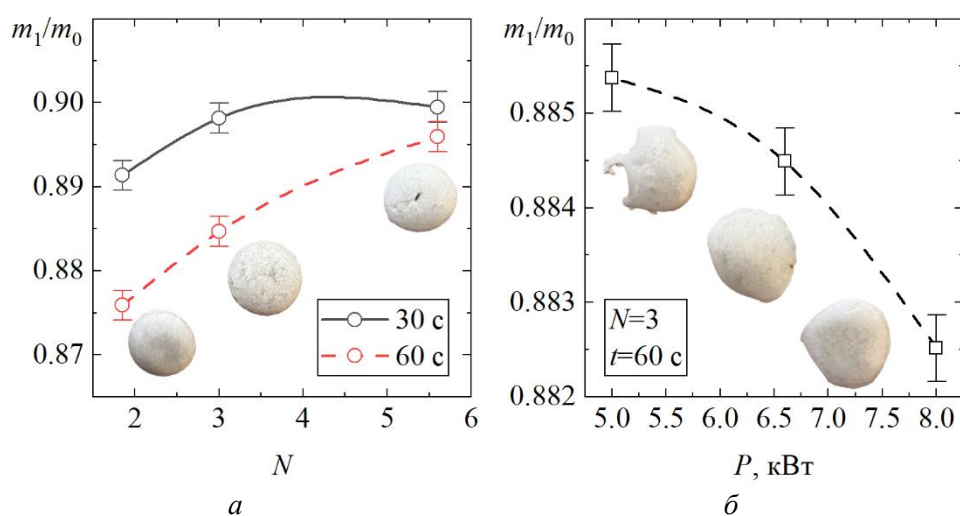


Рис. 2. Потеря массы конденсированной фазы при синтезе керамических образцов: а – зависимость потери массы от N ; б – зависимость потери массы от установленной мощности

Образцы, полученные при времени воздействия плазменной струи на подготовленную шихту в течение 30 с, имеют неправильную сферическую форму, что связано с недостаточным получением тепловой энергии в процессе синтеза (повышенная вязкость расплава). Образы, полученные в течение 60 с,

характеризуются полусферами (диаметр 23 мм, толщина 11 мм), отклонение от сферичности не превышает 5 % в рамках 10 экспериментов. Это указывает на факт полного перехода исходных компонентов в расплавленное состояние [11]. Таким образом, установлено, что оптимальным режимом плавления 8 г исходного материала является: сила тока 80 А, напряжение 100 В и время воздействия плазменного потока 60 с. При таких технических параметрах количество подводимой энергии составляет порядка 480 кДж.

Сравнивая внешний вид полученных продуктов плавления по коэффициенту N , можно явно увидеть существенную разницу в соотношении аморфной и кристаллической фазы, что напрямую определяется содержанием кремнезёма в составе исходной шихты и коррелирует с полученными рентгеновскими дифрактограммами, снятыми с данных образцов (рис. 3).

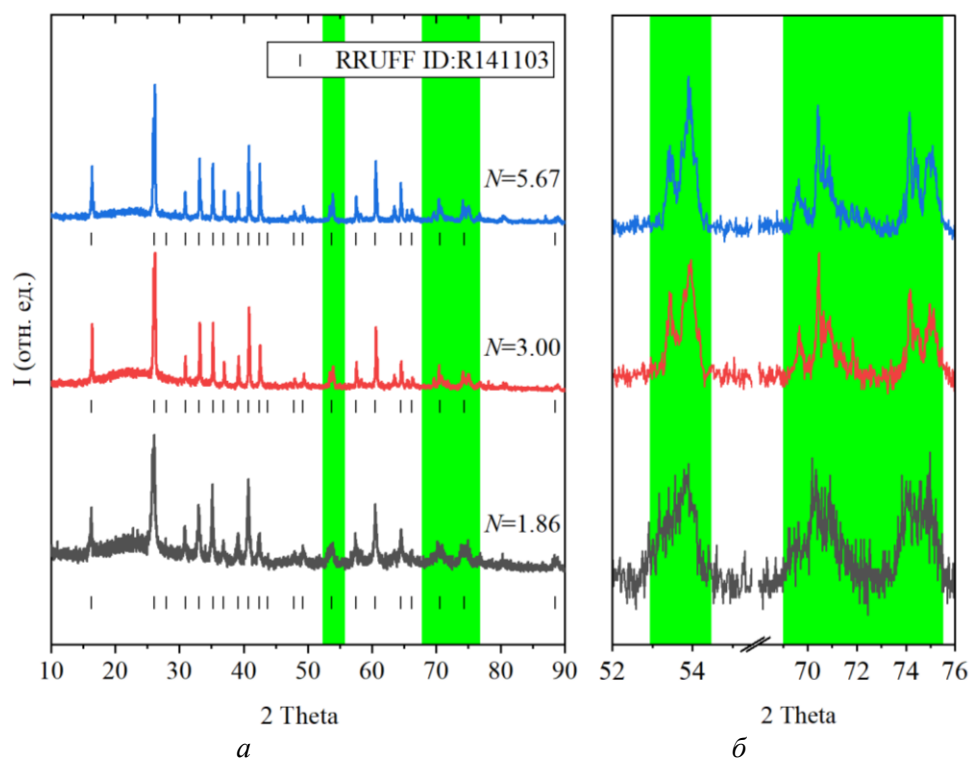


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы полученных продуктов плавления при разном стехиометрическом соотношении N :

a – общий вид; b – участок для $2\theta = 52\text{--}76^\circ$

Во всех случаях синтезированные керамические образцы характеризуются кристаллической фазой муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$. Основные дифракционные максимумы для $2\theta = 16,3; 26,2; 30,9\text{--}42,5; 60,5^\circ$ согласуются с эталонной карточкой ID = R141101, полученной из интегрированной базы данных RRUFF, содержащей спектры рентгеновской дифракции и химических данных для минералов различных групп. Состав муллитовой фазы описывается формулой $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$,

параметры решетки соответствуют: $a = 0,752$; $b = 0,768$; $c = 0,289$ нм, орторомбическая сингония. При этом для $N = 1,86$ присутствуют скрытокристаллические дифракционные максимумы в районе $2\theta = 53\text{--}54^\circ$ и $69\text{--}76^\circ$, что обусловлено повышенным содержанием SiO_2 в шихте и способствует образованию нестехиометрического муллита.

На основе визуальной оценки и согласно диаграмме состояния $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ дальнейшие физико-химические исследования проведены для полученных образцов со стехиометрическим соотношением $N = 3$. На рис. 4 представлены результаты сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии синтезированного образца. Морфология представлена четким разделением нитевидных кристаллов муллита, расположенных в монолитном аморфном каркасе. Элементный состав, полученный со спектральной области 30×30 мкм, показал наличие следующих элементов: Al ~ 35 , Si ~ 20 и O ~ 40 масс. %. Присутствие в составе углерода C $\sim 5,6$ масс. % обусловлено использованием графитового тигля в процессе проведения экспериментальных исследований, частицы которого могут оседать на поверхности образца.

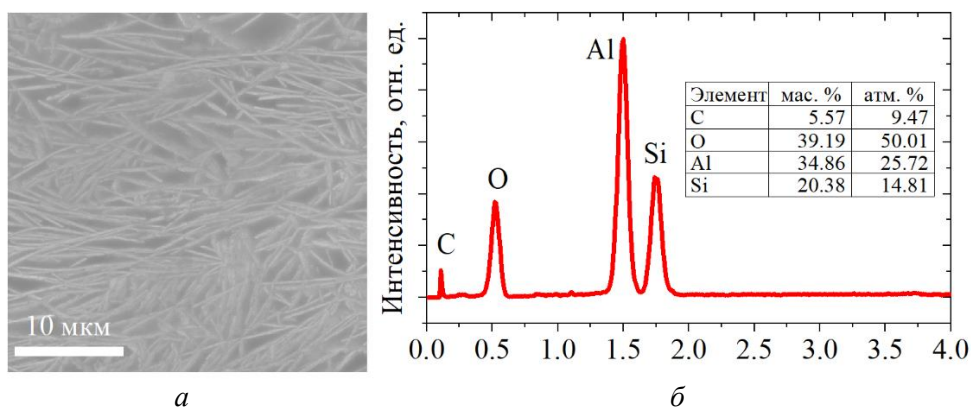


Рис. 4. Результаты сканирующей электронной микроскопии керамического образца $N = 3$: а – электронный снимок поверхности синтезируемого образца; б – энергодисперсионный рентгеновский спектр

На рис. 5, а представлено распределение длины нитевидных кристаллов в матрице керамического образца. Нитевидные кристаллы характеризуются средней длиной $3,326$ мкм и толщиной $0,86$ мкм. На рис. 5, б представлено типичное картированное СЭМ-изображение, которое показывает, что матрица синтезируемого образца состоит из кристаллических волокон (1), имеющих переходную границу в виде стеклокристаллической фазы (2), перетекающей в аморфную (3).

Данное морфологическое сочетание фаз позволяет армировать стеклофазу перколированными кристаллическими волокнами, а переходный слой между ними только улучшает адгезионные свойства керамической матрицы в целом.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить оптимальный режим плавления, при котором формируется

плотная капля расплава, что является критерием достижения твердофазных частиц температуры плавления и формирования гомогенного расплава. Количество затраченной энергии в этом случае составляет 480 кДж.

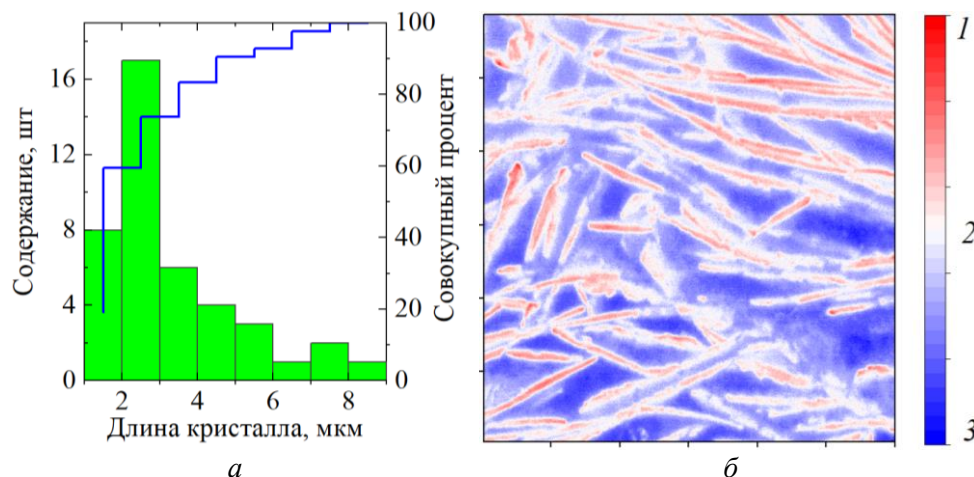


Рис. 5. Распределение длины кристаллов в керамической матрице (а) и картирование микроструктуры керамического образца (б):

1 – кристаллическая фаза; 2 – стеклокристаллическая фаза; 3 – аморфная фаза

Установлено, что при вариации стехиометрического соотношения $N = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ от 1,86 до 5,67 фазовый состав синтезируемых образцов представлен в основном фазой муллита, что подтверждено основными дифракционными максимумами при $2\theta = 16,3; 26,2; 30,9\text{--}42,5; 60,5^\circ$. При этом для $N = 1,86$ присутствуют скрытокристаллические дифракционные максимумы в районе $2\theta = 53\text{--}54^\circ$ и $69\text{--}76^\circ$, что обусловлено повышенным содержанием SiO_2 . Микроструктура у синтезированных образцов при $N = 3$ представлена четким разделением нитевидных кристаллов, расположенных в монолитном каркасе. Средняя длина кристалла составляет 3,3 мкм при толщине 0,86 мкм.

Проведенное картирование матрицы синтезируемого образца показало наличие переходных участков в области границ нитевидных кристаллов. Переходная граница состоит из стеклокристаллической фазы, что согласуется с результатами рентгенофазового анализа.

Полученные результаты представляют интерес для специалистов производства огнеупорных материалов. Данные исследования являются основой получения муллитовой керамики литейным методом с использованием энергии плазмы, что позволит улучшить производительность существующих огнеупорных предприятий за счет выбора сырья, его подготовки, конструкции установки и способа охлаждения расплава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Costa Oliveira F.A., Livramento V., Delmas F. Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes: I. Densification behaviour //J. Mater. Process. Technol. 2008. V. 196. № 1–3. P. 101–108.

2. Zhou Y.D.J., Lin B., Wang Y., et al. Reaction-sintered porous mineral-based mullite ceramic membrane supports made from recycled materials // *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 172. № 1. P. 180–186.
3. Bagchi B., Das S., Bhattacharya A., et al. Nanocrystalline mullite synthesis at a low temperature // *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. V. 92. № 3. P. 748–751.
4. Kim H.S., Nicholson P.S. Use of mixed-rare-earth oxide in the preparation of reaction-bonded mullite at temperature < 1700 °C // *J. Amer. Chem. Soc.* 2002. V. 85. № 7. P. 1730–1734.
5. Aryal S., Rulis P., Ching W.Y. Mechanical properties and electronic structure of mullite phases using first-principles modeling // *J. Am. Ceram. Soc.* 2012. V. 95. P. 2075–2088.
6. Liu M.Z., Zhu Z.W., Zhang Z., Chu Y.C., Yuan B., Wei Z.L. Development of highly porous mullite whisker ceramic membranes for oil-in-water separation and resource utilization of coal gangue // *Sep. Purif. Technol.* 2020. V. 237. P. 1–10.
7. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В., Хайсундинов А.И. Электродуговые и электроплазменные устройства для переработки силикатсодержащих отходов // *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2014. Т. 57. № 3–3. С. 109–113.
8. Патент № 2664287 Российская Федерация. Устройство для получения микросфер и микрошариков из оксидных материалов : опубл. 16.08.2018 / Шеховцов В.В., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Чибирков В.К. Бюл. № 23.
9. Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Процессы получения силикатных расплавов и материалов на их основе в низкотемпературной плазме // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2017. № 1 (60). С. 144–148.
10. Гафаров, Р.Е., Шеховцов В.В. Получение муллита из каолиновой глины с помощью энергии плазмы // *Перспективы развития фундаментальных наук : сб. научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.* 2021. С. 71–73.
11. Волокитин О.Г., Верещагин В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В. Получение силикатных расплавов с высоким силикатным модулем из кварц-полевошпатсодержащего сырья по плазменной технологии // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология.* 2014. Т. 57. № 1. С. 73–77.

REFERENCES

1. Costa Oliveira F.A., Livramento V., Delmas F. Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes: I. Densification behaviour. *Journal of Mechanical Working Technology.* 2008. V. 196. No. 1–3. Pp. 101–108.
2. Zhou Y.D.J., Lin B., Wang Y. et al. Reaction-sintered porous mineral-based mullite ceramic membrane supports made from recycled materials. *Journal of Hazardous Materials.* 2009. V. 172. No. 1. Pp. 180–186.
3. Bagchi B., Das S., Bhattacharya A., et al. Nanocrystalline mullite synthesis at a low temperature. *Journal of the American Ceramic Society.* 2009. V. 92. No. 3. Pp. 748–751.
4. Kim, H.S. Nicholson P.S. Use of mixed-rare-earth oxide in the preparation of reaction-bonded mullite at temperature < 1700 °C. *Journal of the American Ceramic Society.* 2002. V. 85. No. 7. Pp. 1730–1734.
5. Aryal S., Rulis P., Ching W.Y. Mechanical properties and electronic structure of mullite phases using first-principles modeling. *Journal of the American Ceramic Society.* 2012. V. 95. Pp. 2075–2088.
6. Liu M.Z., Zhu Z.W., Zhang Z., Chu Y.C., Yuan B., Wei Z.L. Development of highly porous mullite whisker ceramic membranes for oil-in-water separation and resource utilization of coal gangue. *Separation and Purification Technology.* 2020. V. 237. Pp. 1–10.
7. Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V., Khaysundinov A.I. Elektrodogovyye i elektroplazmennyye ustroystva dlya pererabotki silikatsoderzhashchikh ot-khodov [Electric arc and plasma devices for recycling silicate-containing waste]. *Izvestiya vys-shikh uchebnykh zavedeniy. Fizika.* 2014. V. 57. No. 3–3. Pp. 109–113. (rus)
8. Shekhovtsov V.V., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Chibirkov V.K. Ustroystvo dlya polucheniya mikrosfer i mikrosharikov iz oksidnykh materialov [Device for producing microspheres from oxide materials]. *Invention Patent Russ. Fed. N 2664287.* 2018. (rus)

9. Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. Protssy polucheniya silikatnykh rasplavov i materialov na ikh osnove v nizektemperaturnoy plazme [Silicate melts and materials produced therefrom using low-temperature plasma]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 1 (60). Pp. 144–148. (rus)
10. Gafarov, R.Ye., Shekhovtsov V.V. Polucheniye mullita iz kaolinovoy gliny s pomoshch'yu energii plazmy [Mullite sunthesis from kaolin clay using plasma energy]. In: *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk: Sbornik nauchnykh trudov XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (Proc. 18th Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Prospects of Fundamental Sciences Development')*. 2021. Pp. 71–73. (rus)
11. Volokitin O.G., Vereshchagin V.I., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V. Polucheniye silikatnykh rasplavov s vysokim silikatnym modulem iz kvartspolevoshpatsoderzhashchego syr'ya po plazmennoy tekhnologii [Production of silicate melts with high silicate modulus from quartz-feldspar-containing raw materials using plasma treatment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2014. V. 57. No. 1. Pp. 73–77. (rus)

Сведения об авторах

Шеховцов Валентин Валерьевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Скрипникова Нелли Карповна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nks2003@mail.ru

Гафаров Руслан Евгеньевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, GreexRayne@gmail.com

Волокитин Олег Геннадьевич, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, volokitin_oleg@mail.ru

Authors Details

Valentin V. Shekhovtsov, PhD, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

Nelli K. Skripnikova, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nks2003@mail.ru

Ruslan E. Gafarov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, GreexRayne@gmail.com

Oleg G. Volokitin, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, volokitin_oleg@mail.ru

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-139-152

А.А. КРУТИЛИН¹, Т.В. КРАПЧЕТОВА²,
Н.А. ИНЬКОВА¹, О.К. ПАХОМОВА¹,

¹Себряковский филиал

Волгоградского государственного технического университета,

²АО «Себряковцемент»

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА НА ЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ

Аннотация. Исследовательские работы, устанавливающие связь активности клинкера с тонкостью его помола и минералогическим составом, показывают, что если условия обжига и охлаждения клинкера на конкретной печи завода остаются неизменными на протяжении определенного промежутка времени, то приближенно можно считать структуру клинкера неизменной.

Авторами настоящей работы была изучена зависимость активности портландцементного клинкера от некоторых характеристик его структуры, сведения о которых были получены при исследовании основных клинкерных минералов.

Исследование шести полиморфных модификаций алита и измерение параметров их кристаллических решеток позволило установить характеристические участки рентгенограммы, по которым можно идентифицировать полиморфные модификации алита.

Ключевые слова: алит, клинкер, минералогический состав, рентгеновский фазовый анализ, метод петрографического анализа, минералообразование, кристаллообразование

Для цитирования: Крутилин А.А., Крапчетьева Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Влияние структуры портландцементного клинкера на его гидравлическую активность // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 139–152.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-139-152

A.A. KRUTILIN¹, T.V. KRAPCHETOVA²,
N.A. INKOVA¹, O.K. PAKHOMOVA¹,

¹Sebryakovsk Branch of Volgograd State Technical University,

²AO "Sebryakovtsement"

STRUCTURE INFLUENCE OF PORTLAND CEMENT CLINKER ON ITS HYDRAULIC ACTIVITY

Abstract. Research into the dependence between the clinker activity and its fine structure and mineralogical composition shows that at the constant conditions of clinker baking and cooling in a particular furnace for a certain period of time, the clinker structure can be considered as unchanged. This paper studies the dependence of the clinker activity of Portland cement on its structure based on the data obtained during the study of the main clinker minerals. The study of six polymorphic modifications of alite and the lattices parameter measurement help to obtain X-ray diffraction patterns, which identify polymorphic modifications of alite.

Keywords: alite, clinker, mineralogical composition, X-ray diffraction analysis, petrographic analysis, mineralization, crystal formation

For citation: Krutilin A.A., Krapchetova T.V., Inkova N.A., Pakhomova O.K. Vliyanie struktury portlandtsementnogo klinkera na ego gidravlicheskuyu aktivnost' [Structure influence of portland cement clinker on its hydraulic activity]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 139–152. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-139-152

Из одной и той же сырьевой смеси оптимального химического состава в зависимости от характера процесса обжига и охлаждения клинкера можно получить продукт различного минералогического состава, различной макро- и микроструктуры [1].

Активность портландцементного клинкера зависит от многих факторов, среди которых удельная поверхность, количественный фактический минералогический состав, а также структура клинкера являются определяющими. Зависимость активности клинкера от тонкости помола и минералогического состава не является однозначной, т. к. структура клинкера различна [Там же].

Исследовательские работы, устанавливающие связь активности клинкера с тонкостью его помола и минералогическим составом, показывают, что если условия обжига и охлаждения клинкера на конкретной печи завода остаются неизменными на протяжении определенного промежутка времени, то приближенно можно считать структуру клинкера неизменной. В реальных условиях работы завода трудно добиться стабильности процесса обжига.

Но, с другой стороны, т. к. процесс обжига клинкера отражается на его структуре и минералогическом составе, контроль стабильности обжига и его автоматизация могут быть осуществлены путем контроля параметров, их стабилизации на оптимальном уровне [10, 15].

Авторами настоящей статьи была изучена зависимость активности портландцементного клинкера от некоторых характеристик его структуры, сведения о которых были получены при исследовании основных клинкерных минералов.

Для решения этих вопросов были использованы рентгеновский фазовый анализ и метод петрографического анализа [14]. Измерения выполнялись на приборах производства компании Bruker (Германия) – рентгенофлуоресцентного спектрометра S8 TIGER и рентгеновского дифрактометра D8 ENDEAVOR. Тонкая структура синтетических клинкерных минералов и их композиций достаточно изучена [5, 9]. Большинство из научных работ посвящено выяснению влияния различных нарушений стехиометрии силикатных минералов на их тонкую структуру. Лишь немногие исследователи ставят своей целью связывать стехиометрические отклонения и структурные вариации изучаемых минералов с их гидратационной активностью [2, 3, 6, 7].

Исследование шести полиморфных модификаций алита и измерение параметров их кристаллических решеток позволило установить характеристические участки рентгенограммы, по которым можно идентифицировать полиморфные модификации алита.

А. Гинье и М. Регур считают, что дифракционное отражение, наблюдаемое под углами $2\theta = 51\text{--}52^\circ$, несмотря на невысокую интенсивность, наиме-

нее подвержено наложению других отражений, и именно под этими углами предлагают идентифицировать алит и его формы.

Исследования влияния полиморфизма на реакционную способность CaSiO_3 показали, что полиморфные модификации трехкальциевого силиката имеют разную гидравлическую активность. Например, по данным работы R. Kondo «Hydratation of portland cement minerals», гидратация моноклинной формы алита происходит несколько быстрее, чем триклинной. Многие исследователи, а именно: Ю.С. Малинин, В.А. Дмитриева, О.П. Мчедлов-Петросян, Л.Д. Ершов, П.А. Староминская, Н.П. Коган, R. Kondo, А.И. Бойкова, считают, что влияние структуры алита на его гидравлическую активность незначительно, но указывают, что моноклиннотриклинная модификация может явиться причиной низкой прочности камня.

Таким образом, различные исследователи не единодушны во мнении, какая из полиморфных модификаций алита обладает более высокой гидравлической активностью. На наш взгляд, причина разногласий в том, что химические свойства алита определяются не только полиморфной модификацией минерала, но и кристаллохимическими условиями стабилизации этих форм, т. е. совокупностью факторов, определяющих энергетику и химический потенциал минерала.

К настоящему времени синтетический алит исследован достаточно подробно, а минерал производственного клинкера – значительно меньше [8].

Нами сделана попытка исследования методами рентгеновской дифракции и петрографическим анализом фазы промышленных клинкеров.

Методы исследований

Для исследований структуры алита использованы химический и рентгеновский фазовый анализ. Активность клинкера определяли по ГОСТ 30744–2001 [4, 11, 12].

Рентгенографические исследования проведены на дифрактометре D8 ENDEAVOR. Параметры работы прибора и режим съёмки приведены на рис. 1 и 2.

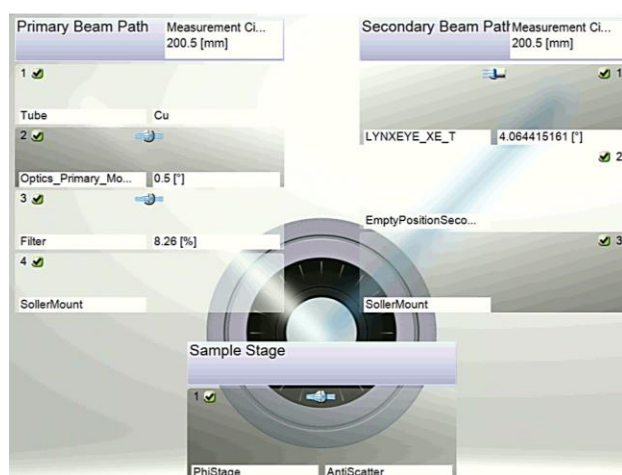


Рис. 1. Параметры работы прибора

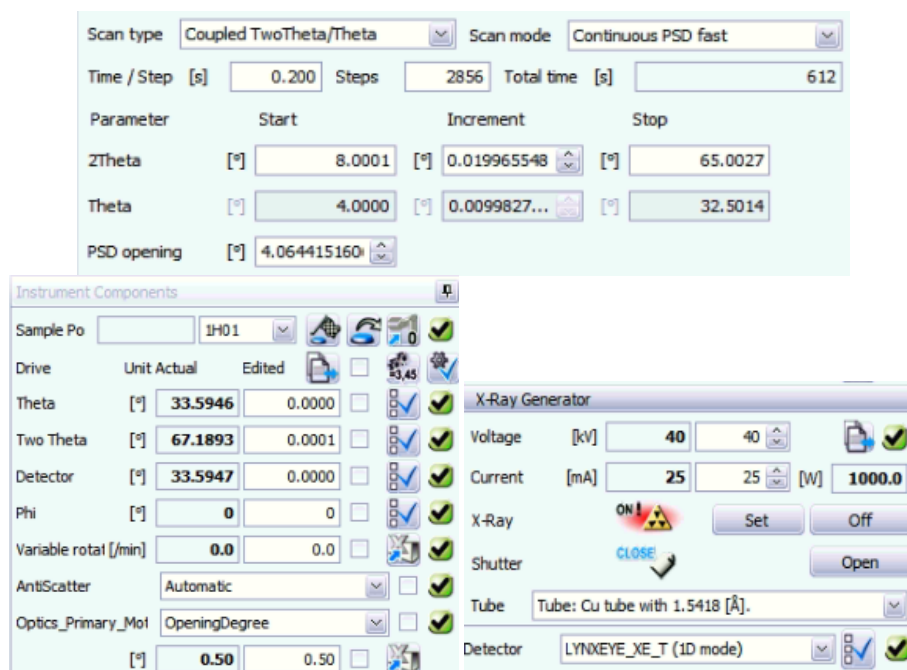


Рис. 2. Параметры режима съёмки

Экспериментальные исследования

Исследования зависимости активности портландцементного клинкера от его структуры проводились на промышленных клинкерах, полученных в условиях вращающейся печи $\varnothing 4,35 \times 54$ м. Полученные результаты сравнивались с показателями синтетических минералов.

Проводимые исследования в области искусственно получаемого Ca_3SiO_5 , модифицированного различными добавками, показывают, что в зависимости от вида и количества синтетических минералов алит стабилизируется в различных формах (рис. 3). В качестве модифицирующих примесей применялись Cr_2O_3 , NiO , Ni_2O_3 , чистый Ca_3SiO_5 .

На рис. 3 представлены дифрактограммы Ca_3SiO_5 разных модификаций (различный профиль линий).

Процессы минералообразования и кристаллообразования в промышленных печных агрегатах носят динамический характер в отличие от синтетических условий синтеза искусственного алита в лабораторных условиях. Естественно предположить, что алит в одном и том же клинкере может находиться в различных аллотропных формах. Это становится понятным, если учесть, что часть алита образуется во время твердофазовых реакций при температурах ниже эвтектики до появления расплава. С появлением жидкой фазы происходят резорбция низкотемпературных форм трехкальциевого силиката, ионный обмен (диффузия) между ними и расплавом, изменение стехиометрии алита, обогащение последнего модифицирующими примесями и образование его высокотемпературных форм.

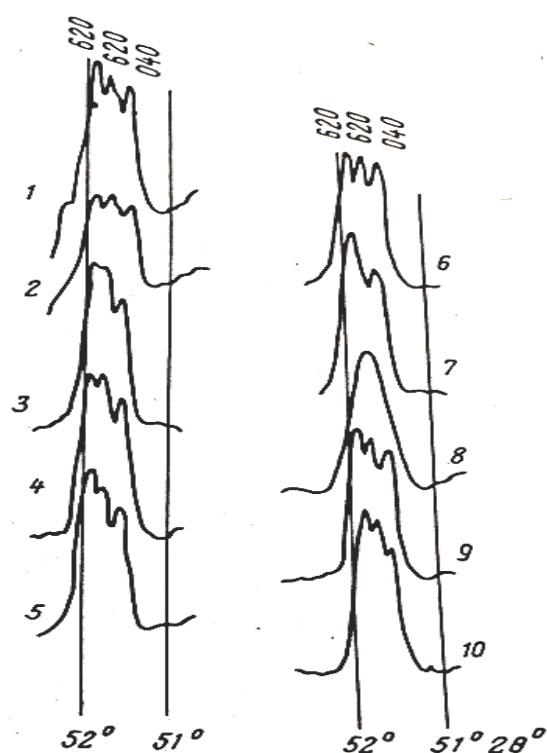


Рис. 3. Дифрактограммы синтетических алитов:

1, 2, 6 – триклинная модификация; 3, 4, 5, 7 – моноклинная модификация; 8 – ромбическая модификация; 9 – смесь из 50 % моноклинного алита; 10 – смесь из 75 % моноклинного и 25 % триклинного алита

Большая интенсивность тепловых процессов, а также последующее охлаждение клинкера может привести к наличию в клинкере различных модификаций алита. Это хорошо заметно на смесях алитов триклинной и моноклинной форм (рис. 3). Сравнение дифрактограмм 9 и 10 показывает, что с увеличением содержания моноклинной формы интенсивность правого пика в триплете в интервале $2\theta = 51-52^\circ$ падает.

Дифрактограммы механических смесей различных модификаций алита имеют характерный профиль линий, отличный от исходных форм. Исследования синтетических алитов и их смесей показывают, что полиморфные модификации алитов имеют достаточно четко идентифицируемые характерные профили линий. Идентификация алитов, содержащих триклинную и моноклинную формы, возможна по профилю их линий. Таким образом, с помощью рентгеновской дифракции можно идентифицировать силикатную часть клинкера.

Дальнейшие исследования промышленных клинкеров показали следующее.

Были взяты клинкеры, полученные в печах мокрого и сухого способов производства (табл. 1, 2). Трёхкомпонентная сырьевая смесь состояла из карбонатной породы – мела, суглинков и огарков Новолипецкого металлургического комбината.

Таблица 1

Химико-минералогический состав промышленных клинкеров

№ проб	Химический состав, %				Рентгенофазовый состав, %				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	C3S	C2S	C3A	C4AF	CaO _{св}
1	22,18	4,69	3,80	66,74	65,1	13,1	5,4	9,2	1,0
2	21,82	4,58	3,78	66,88	67,0	10,4	5,1	9,6	0,7
3	21,68	4,61	3,98	66,90	60,8	12,0	4,9	10,8	1,0
4	22,39	4,61	3,74	66,93	58,0	19,5	4,8	10,0	0,5
5	20,70	4,74	3,91	66,98	70,1	4,5	5,5	10,0	0,7

Таблица 2

Физико-механическая характеристика промышленных клинкеров

№ проб	Сроки схватывания Начало, ч-мин	Нормальная густота теста, %	Остаток на сите 008, %	Удельная поверхность, см ² /г	Предел прочности при сжатии, МПа, через (сут)	
					2	28
1	2-45	23,4	6,1	3686	26,4	52,4
2	3-05	24,0	6,8	3680	24,6	51,1
3	2-45	23,4	4,8	3345	22,6	50,4
4	2-25	23,8	5,3	3590	21,7	48,6
5	1-55	23,4	5,7	3522	24,9	53,0

Из данных табл. 1 видно, что клинкеры различались между собой по содержанию C₃S от 58 до 70 % при колебании CaO_{св} от 0,5 до 1,0 %.

Исследования промышленных клинкеров, прочности которых почти одинаковы, показывают, что их дифрактограммы (рис. 4) не носят столь ярко выраженный характер и идентифицировать модификацию алита достаточно сложно. Это, очевидно, связано с тем, что условия образования алита в промышленных клинкерах и их химический состав резко отличаются от синтезированных минералов алита, которые фактически являются трехкальциевым силикатом, модифицированным некоторыми добавками (см. рис. 3). На рис. 4 аналитический триплет при $2\theta = 51-52^\circ$ чаще всего характеризуется довольно четким развитием кристаллографической плоскости под углом, близким к 51° . Вероятно, это связано с преобладанием моноклинной модификации алита в фазе трехкальциевого силиката.

Анализируя дифрактограммы, отметим, что в клинкере пробы № 2 трехкальциевый силикат представляет собой структуру, близкую к моноклинной, которая образуется при внедрении в решетку трехкальциевого силиката сравнительно большого количества примеси, ионный радиус которой меньше, чем у Ca, а доля ковалентности связи Me – O значительно выше.

В клинкере пробы № 1 алит также представлен моноклинной формой, которая характерна для трехкальциевого силиката, но с меньшим содержанием примеси (возможно, менее 2 % MgO по сравнению с предыдущим клинкером). Что касается клинкера проб № 3 и № 4, то здесь алит закристаллизован хуже, чем в двух предыдущих клинкерах, и определить тип его структуры сложно. Клинкер пробы № 5 резко отличается, его структура ближе к ромбической (рис. 3, структура номер 8).

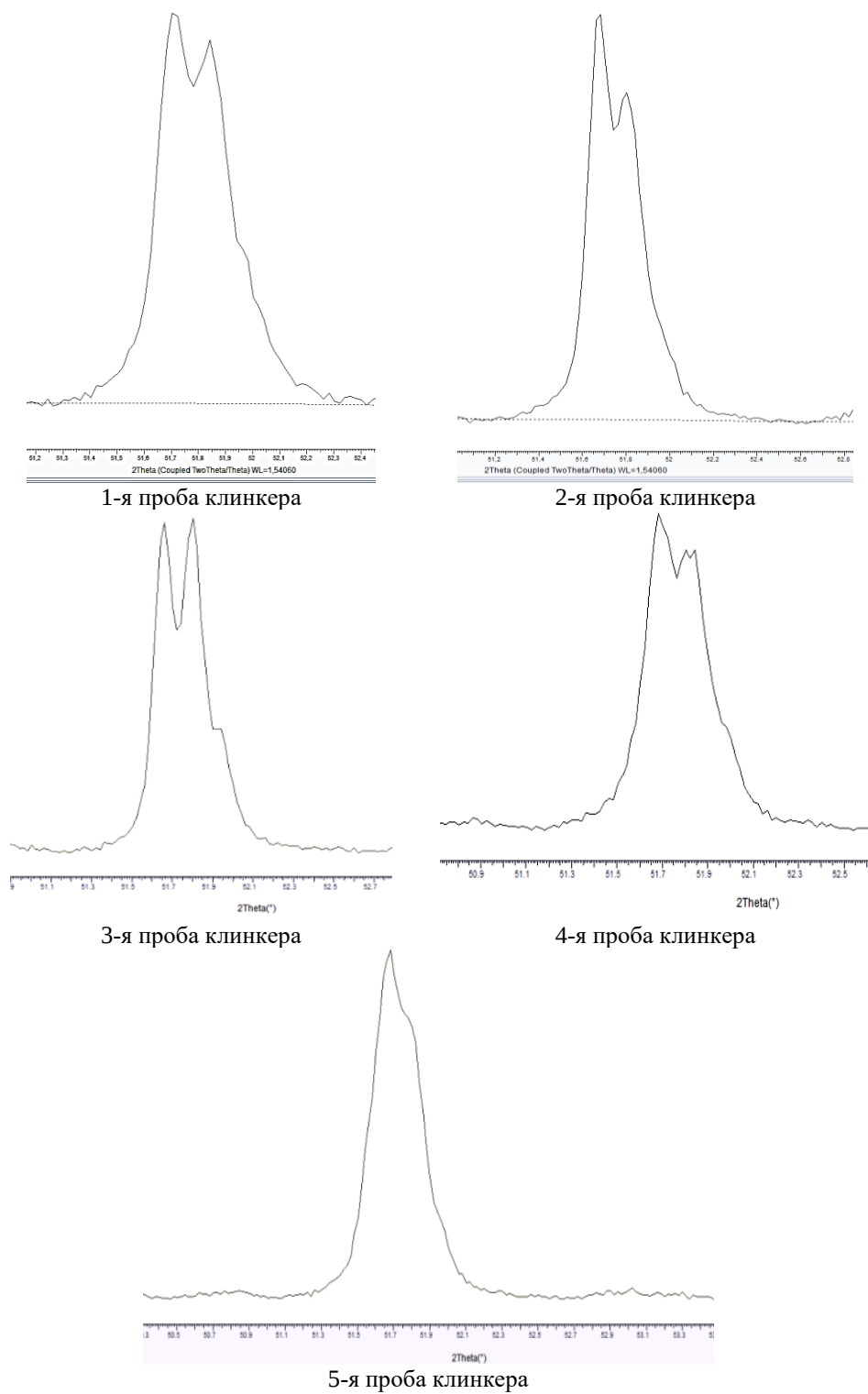


Рис. 4. Дифрактограммы промышленных клинкеров

Различие структур этих клинкеров показывает разную их активность – от 48,6 до 53 МПа (ГОСТ 30744–2001).

На рис. 5 приведены участки дифрактограмм клинкеров, характеризующихся различным содержанием $\text{CaO}_{\text{св}}$ в их составе.

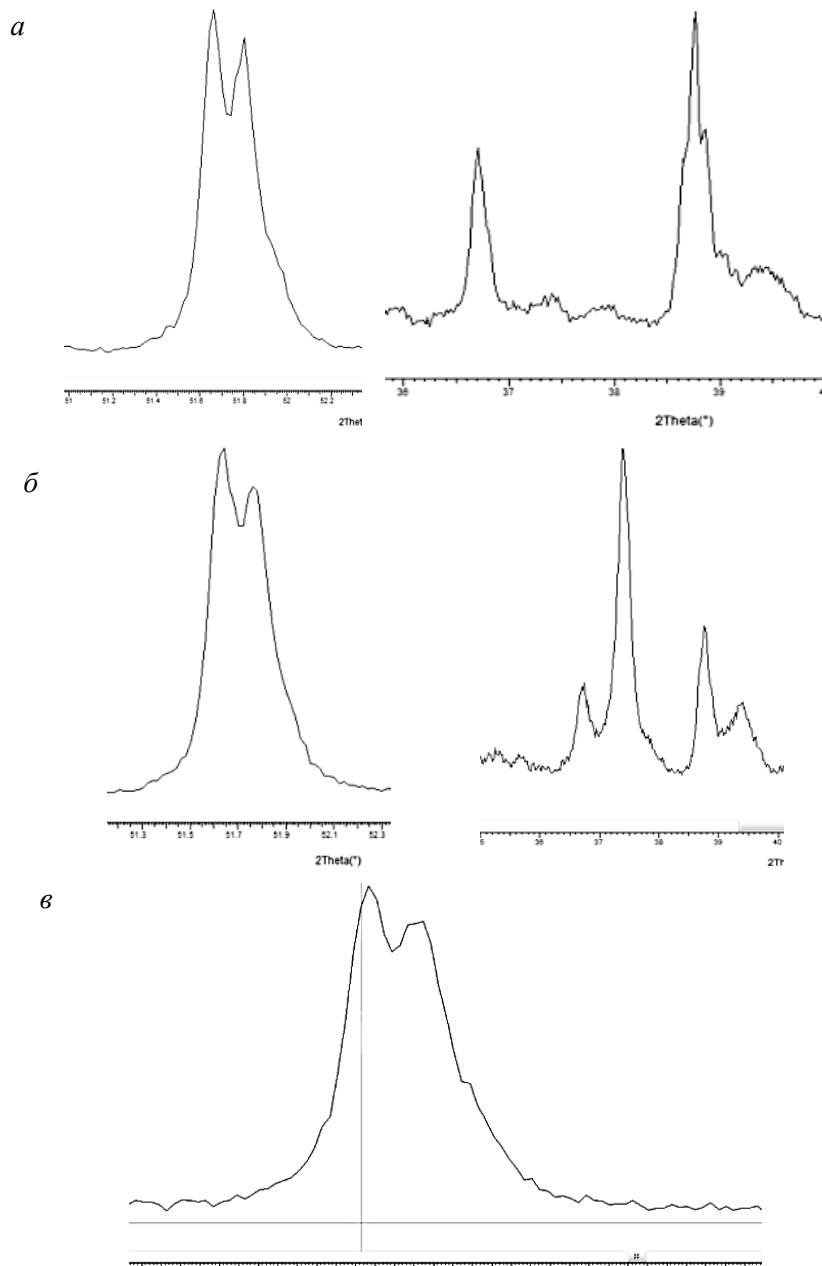


Рис. 5. Дифрактограммы промышленных клинкеров с различным содержанием свободной извести:

a – содержание свободного оксида кальция 0,38 %; *б* – содержание свободного оксида кальция 3,5 %; *в* – содержание свободного оксида кальция 5,5 %

Аналитические участки дифрактограмм алита этих образцов клинкера согласуются с количеством $\text{CaO}_{\text{св}}$. Широкая малоинтенсивная линия алита характерна для плохо оформленных кристаллов алита клинкера с 5,5 % $\text{CaO}_{\text{св}}$. Можно предположить, что алит в этом клинкере имеет дефектную структуру.

Как следует из дифрактограммы, алит в клинкере с 3,5 % $\text{CaO}_{\text{св}}$ лучше оформлен, представлен смешанной моноклинной формой, но незавершенность процесса рекристаллизации этого минерала приводит к некоторому уширению профиля линии по сравнению с хорошо оформленным моноклинным алитом в образце клинкера с 0,38 % CaO . Отличительной особенностью этих образцов является стабилизация моноклинной формы алита при значительном содержании $\text{CaO}_{\text{св}}$ 3,5 %. Это объясняется достаточным количеством MgO в сырье завода.

Петрографические исследования промышленных клинкеров показали, что независимо от количественного минералогического состава все клинкеры характеризовались неоднородной, неравномернoзернистой структурой с малоотчётливой и относительно отчетливой кристаллизацией минералов (рис. 6).



Рис. 6. Микроструктура клинкеров

Алит представлен сростками и зернами неправильной формы (рис. 7), белит – сростками и зернами округлой и неправильной формы (рис. 8). Свободная известь образует мелкие гнёзда (рис. 9).

Типы структуры клинкеров, представленные в микрофотографиях, изготовлены из полированных шлифов при увеличении $500\times$ с использованием в качестве травителя 0,1Н HCl . Микрофотографии представлены образцами клинкеров, полученных сухим способом производства.

Анализ исследованных проб клинкера свидетельствует о том, что стабилизация отдельных полиморфных модификаций алита в клинкере может происходить из-за малых составляющих, но и за счет диффузии ионов Al^{3+} и Fe^{3+} из жидкой фазы при благоприятных для этого условиях (температура и вязкость).

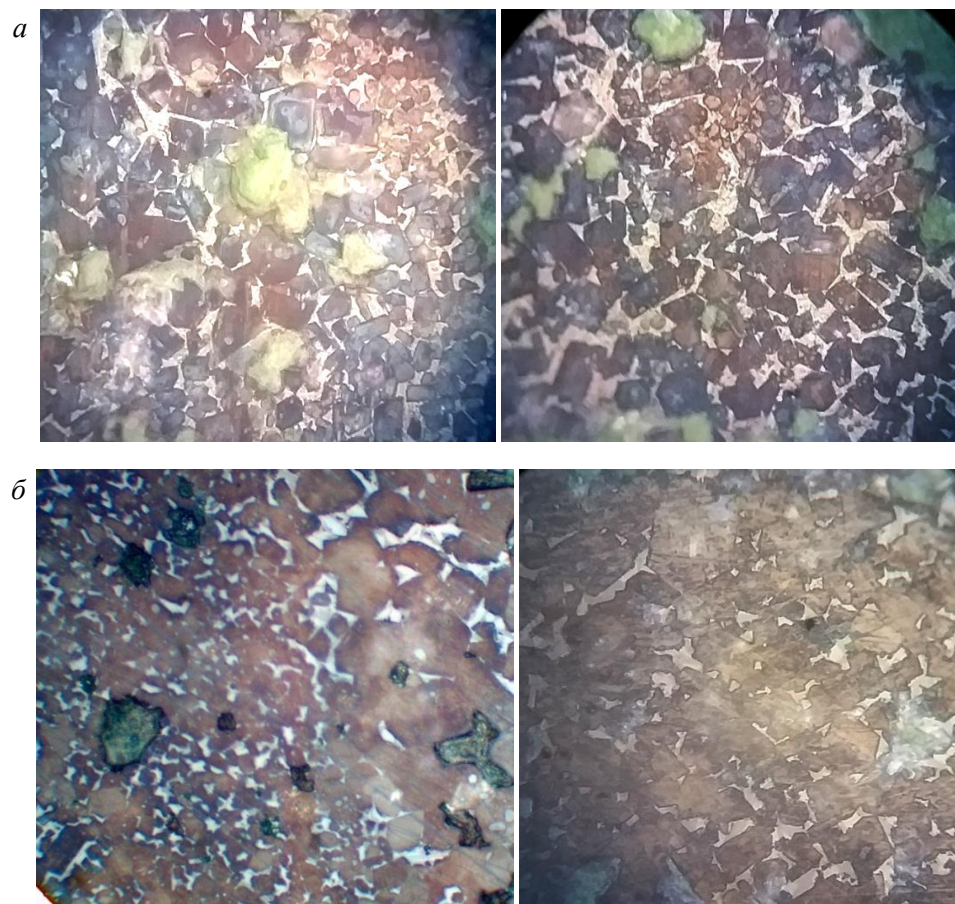


Рис. 7. Микроструктура алита:

а – алит представлен призмами и многогранниками неправильной формы; *б* – алит представлен мелкими и крупными сrostками, структура неоднородна

Известно [9], что гидравлическая активность алита связана с его кристаллической структурой. Следовательно, гидравлическая активность клинкера зависит от модификации алита, а последняя, как показано выше, связана с составом жидкой фазы. Анализируя гидравлическую активность исследуемых клинкеров, отметим следующее – для структуры клинкеров, проявляющих наилучшие гидравлические свойства, характерна хорошо оформленная моноклинная модификация алита с наименьшим значением полуширины линий, а алюмоферритная фаза представлена высокоалюминатными кристаллическими образованиями, особенностью структуры которых является замена части ионов Fe^{3+} ионами Al^{3+} в соответствующих слоях кислородных комплексов (пробы клинкеров № 6).

Для этих клинкеров (рис. 10) профиль линий алита отличается тем, что в характеристическом дублете более интенсивной является линия, соответствующая плоскости (620). Остальные исследуемые клинкеры обладают комплексом указанных выше признаков, и гидравлическая активность их ниже.



Рис. 8. Микроструктура белита:

а – белит представлен неоднородной структурой, зёрнами округлой неправильной формы, отдельные кристаллы зазубрены; *б* – сrostки зёрен белита



Рис. 9. Свободный оксид кальция на поверхности кристаллов

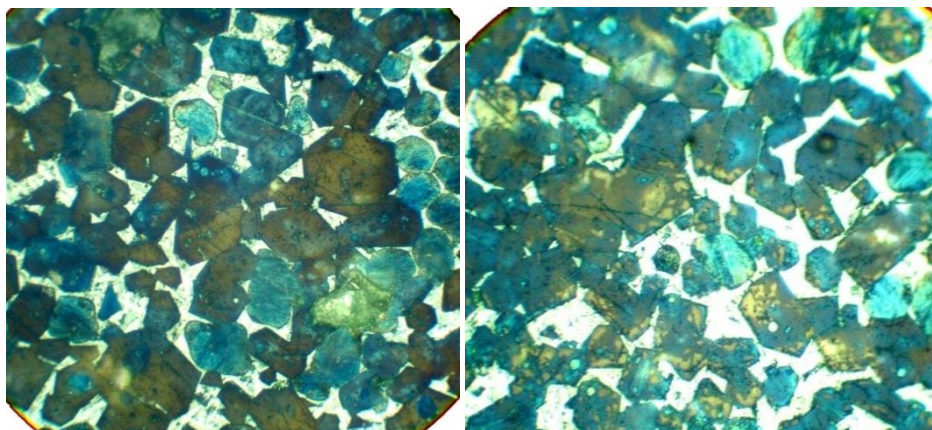


Рис. 10. Отчётливая кристаллизация алита в виде призм и многогранников

Таким образом, комплексное использование метода рентгенографической дифракции и петрографии позволяет выявить особенности тонкой структуры алита, оказывающие влияние на гидравлическую активность клинкеров. Высокоактивные клинкеры характеризуются наличием моноклинной модификации алита и хорошо оформленными кристаллическими образованиями.

Для структуры клинкеров, имеющих высокую гидравлическую активность, характерна хорошо оформленная модификация алита, которая, в частности, может стабилизироваться в клинкерах со значительным содержанием свободной извести при наличии достаточного количества MgO в сырьевой смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреева Н.А. Химия цемента и вяжущих веществ. Санкт-Петербург, 2011. 67 с.
2. Белов Н.В. и др. Кристаллическая структура трехкальциевого силиката $3CaO \cdot SiO_2$ // Кристаллография. 1975. Т. 20. Вып. 4. С. 721–729.
3. Бойкова А.И., Есаян А.К., Соколова Р.А., Доманский А.И., Пирютко М.М. Физико-химическое исследование алиитовых клинкеров // Цемент. 1981. № 6. С. 13–15.
4. Бойкова А.И. Микрорентгеноспектральный анализ в химии цемента. Строительные материалы. 2007. № 3. С. 79–84.
5. Бойкова А.И. Особенности минералогии клинкерных композиций и их практическое значение // XX Всероссийское (IV Международное) совещание начальников лабораторий цементных заводов. Москва, 2002. С. 165–172.
6. Бойкова А.И. Химия, структура и свойства клинкеров // Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее : труды Международной научно-практической конференции. Москва, 2003. Т. I. С. 107–126.
7. Классен В.К., Михин А.С. Анализ изменения активности клинкера на ОАО «Себряков-цемент» // Фундаментальные исследования. 2006. № 2. С. 63.
8. Козлова В.К., Григорьев В.Г., Малова Е.Ю., Божок Е.В., Мануйлов Е.В. Сравнительные результаты определения фазового состава и микроструктуры клинкеров методами физико-химического анализа // Цемент и его применение. 2013. № 3. С. 34–38.
9. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. Москва : Высшая школа, 1989. 384 с.
10. Лугинина И.Г. Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов. Белгород, 2004.

11. Малова Е.Ю., Мануйлов Е.В., Козлова В.К., Манокха А.М., Вольф А.В. Определение минералогического состава клинкеров комбинированным методом анализа // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 79–83.
12. Тейлор Х. Химия цемента. Москва : Мир, 1996. 560 с.
13. Усов Б.А. Химия и технология цемента. Москва, 2015. 158 с.
14. Чижов П.С. Прецизионный рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ клинкеров российских цементных заводов // Цемент и его применение. 2012. № 3. С. 66–69.
15. Шмитко Е.И., Крылова А.В., Шаталова В.В. Химия цемента и вяжущих веществ. Санкт-Петербург : Проспект науки, 2006. 205 с.

REFERENCES

1. Andreeva N.A. Khimiya tsementa i vyazhushchikh veshchestv [Chemistry of cement and binders]. Saint-Petersburg, 2011. (rus)
2. Belov N.V., et al. Kristallicheskaya struktura trekhkal'tsievogo silikata $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [Crystal structure of tricalcium silicate $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$]. *Kristallografiya*. 1975. V. 20. No. 4. Pp. 721–729. (rus)
3. Boikova A.I., Esayan A.K., Sokolova R.A., Domanskii A.I., Piryutko M.M. Fiziko-khimicheskoe issledovanie alinitovykh klunkerov [Physicochemical investigation of alinite clinkers]. *Tsement*. 1981. No. 6. Pp. 13–15. (rus)
4. Boikova A.I. Mikrorentgenospektral'nyi analiz v khimii tsementa [Microradiography in chemistry of cement]. *Stroitel'nye materialy*. 2007. No. 3. Pp. 79–84. (rus)
5. Boikova A.I. Osobennosti mineralogii klunkernykh kompozitsii i ikh prakticheskoe znachenie [Mineralogy of clinker compositions and their practical significance]. In: XX Vserossiiskoe (IV Mezhdunarodnoe) soveshchanie nachal'nikov laboratorii tsementnykh zavodov (*The 20th All-Russian (IV International) Meeting of Laboratory Heads of Cement Plants*). Moscow, 2002. Pp. 165–172. (rus)
6. Boikova A.I. Khimiya, struktura i svoystva klunkerov [Chemistry, structure and properties of clinkers]. In: Nauka i tekhnologiya silikatnykh materialov: nastoyashchee i budushchee: trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (*Proc. Int. Sci. Conf. 'Science and Technology of Silicate Materials: Present and Future'*). Moscow, 2003. V. 1. Pp. 107–126. (rus)
7. Klassen V.K., Mikhin A.S. Analiz izmeneniya aktivnosti klunkera na OAO "Sebryakovtsement" [Analysis of changes in clinker activity at AO "Sebryakovcement"]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2006. No. 2. P. 63. (rus)
8. Kozlova V.K., Grigor'ev V.G., Malova E.Yu., Bozhok E.V., Manuilov E.V. Sravnitel'nye rezul'taty opredeleniya fazovogo sostava i mikrostruktury klunkerov metodami fiziko-khimicheskogo analiza [Physicochemical analysis of clinker phase composition and microstructure]. *Tsement i ego primeneniye*. 2013. No. 3. Pp. 34–38. (rus)
9. Kuznetsova T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V. Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov [Physical chemistry of binding materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 384 p. (rus)
10. Luginina I.G. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh vyazhushchikh materialov [Chemistry and chemical technology of inorganic binding materials]. Belgorod, 2004. (rus)
11. Malova E.Yu., Manuilov E.V., Kozlova V.K., Manokha A.M., Vol'f A.V. Opredelenie mineralogicheskogo sostava klunkerov kombinirovannym metodom analiza [Mixed analysis of clinker mineralogical composition]. *Polzunovskii vestnik*. 2011. No. 1. Pp. 79–83. (rus)
12. Teilor Kh. Khimiya tsementa [Chemistry of cement]. Moscow: Mir, 1996. (rus)
13. Usov B.A. Khimiya i tekhnologiya tsementa [Chemistry and technology of cement]. Moscow, 2015. (rus)
14. Chizhov P.S. Pretsizionnyi rentgenofazovyi i rentgenostrukturnyi analiz klunkerov rossiiskikh tsementnykh zavodov [Precision X-ray phase and structural analysis of clinkers from Russian cement plants]. *Tsement i ego primeneniye*. 2012. No. 3. Pp. 66–69. (rus)
15. Shmit'ko E.I., Krylova A.V., Shatalova V.V. Khimiya tsementa i vyazhushchikh veshchestv [Chemistry of cement and binders]. Saint-Petersburg: Prospekt nauki, 2006. 205 p. (rus)

Сведения об авторах

Крутилин Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Себряковский филиал Волгоградский государственный технический университет, 403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, kotyra84@bk.ru

Кrapчeтoвa Татьяна Владимировна, инженер-аналитик, АО «Себряковцемент», 403342, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Индустриальная, 2, iwankra@mail.ru

Пахомова Олеся Константиновна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградский государственный технический университет, 403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, coyote@bk.ru

Инькова Надежда Александровна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградский государственный технический университет, 403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, pahomovaolesia@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr A. Krutilin, PhD, A/Professor, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, kotyra84@bk.ru

Tatyana V. Krapchetova, Analytical Engineer, AO "Sebyakovcement", 2, Industrialnaya Str., 403342, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, iwankra@mail.ru

Olesya K. Pakhomova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, coyote@bk.ru

Nadezhda A. Inkova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, pahomovaolesia@yandex.ru

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.148

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-153-164

А.Н. БЕЛОУС, М.В. ОВЕРЧЕНКО,

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ ОТ УЧАЩИХСЯ В ЗДАНИЯХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Аннотация. Создание и поддержание микроклимата помещений при минимальных финансовых затратах – одна из основных задач инженеров строительной отрасли. При этом необходимо учитывать не только теплотехнические характеристики современных строительных материалов и конструкций, но и показатели температурного комфорта, основываясь на тепловом балансе человека. Отдельное внимание необходимо уделить теплопоступлениям в зданиях образовательных организаций ввиду отсутствия в нормативной литературе однозначных данных по этому вопросу.

В статье рассмотрены различные методики по определению теплопоступлений от людей, выполнен сравнительный анализ методик, установлены факторы, влияющие на метаболизм и тепловое состояние человека в состоянии покоя и при выполнении работ различных категорий сложности, а также рассчитаны величины теплопоступлений от учащихся с учетом возрастных и физиологических характеристик, которые возможно использовать в дальнейшем при выполнении расчетов теплового баланса зданий образовательных организаций.

Выполнено сравнение рассмотренных методик определения бытовых теплопоступлений от учащихся в образовательных организациях с данными натурного исследования, которое показало высокую степень сходимости результатов исследования.

Ключевые слова: метаболизм, тепловой баланс человека, теплообмен, бытовые теплопоступления, здания образовательных организаций

Для цитирования: Белоус А.Н., Оверченко М.В. Сравнительный анализ методик определения теплопоступлений от учащихся в зданиях образовательных организаций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 153–164.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-153-164

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF IDENTIFICATION TECHNIQUES FOR HEAT GAIN FROM STUDENTS IN EDUCATION INSTITUTIONS

Abstract. Creation and maintenance of indoor climate at the lowest costs is one of the main tasks of engineers in the construction industry. It is necessary to take into account not only the thermal characteristics of modern building materials and structures, but also indicators of thermal comfort based on the heat balance of a person. It is necessary to pay attention to heat losses in the of education institution buildings in the absence of unambiguous required data on this matter in the normative documents. Various techniques of definition of heat gain from people are considered, the comparative analysis of techniques is conducted, factors influencing metabolism and heat balance of a person at rest and at work are identified, and the heat gain from students is calculated with respect to their age and physiological characteristics. These calculations can be used to detect the heat balance of education institution buildings. It is shown that theoretical calculations are in good agreement with the experimental data.

Keywords: metabolism, heat balance, heat exchange, domestic heat gains, education institution buildings

For citation: Belous A.N., Overchenko M.V. Sravnitel'nyi analiz metodik opredeleniya teplopostuplenii ot uchashchikhsya v zdaniyakh obrazovatel'nykh organizatsii [Comparative analysis of identification techniques for heat gain from students in education institutions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 153–164.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-153-164

Введение

Поддержание нормируемой температуры воздуха в помещении в отопительный период является одним из способов экономии энергетических ресурсов, на который оказывают влияние такие факторы, как теплотехнические свойства материалов и конструкций, режим эксплуатации здания, отопительная и вентиляционная системы, а также переменные во времени поступления тепла от оборудования и находящихся в здании людей.

Здания образовательных организаций характеризуются цикличным режимом работы с максимальной заполняемостью помещений в первой половине дня и практически нулевой в остальные часы. Это приводит к росту величины бытовых теплопоступлений от людей в часы максимальной заполняемости и к колебаниям температуры в помещении, что, в свою очередь, влияет на микроклимат помещений и влечет за собой необходимость корректировки работы системы отопления.

Методики определения величин бытовых теплопоступлений по ГОСТ Р 55656–2013 (ИСО 13790:2008) «Энергетические характеристики зданий. Расчет использования энергии для отопления помещений» и ДСТУ Б А.2.2-12:2015 «Энергетическая эффективность зданий. Метод расчета энергопотребления при отоплении, охлаждении, вентиляции, освещении и горячем водоснабжении» (EN ISO 13790) основаны на различных подходах

к определению исследуемой величины бытовых тепlopоступлений и не позволяют однозначно оценить влияние тепlopоступлений от людей в зданиях образовательных организаций.

Вопросам теплообмена человека с внешней средой посвящено большое количество публикаций и проведено много исследований в различных областях науки: врачами-гигиенистами, физиками, а также учеными в области строительной теплотехники начиная с первой половины XX в. [1–6]. Это обусловлено стремлением достичь таких оптимальных параметров внутренней среды, которые позволили бы обеспечить максимальный комфорт при минимальных затратах ресурсов на его поддержание, что особенно важно в условиях политики по снижению выбросов CO₂ в атмосферу и роста цен на энергоресурсы в последние десятилетия. При проектировании тепловой оболочки здания и климатических систем применяют усредненные данные по тепlopоступлениям в помещениях [7–11, 21–23]. Действующая нормативная документация регламентирует показатели для создания необходимого микроклимата в помещениях, ориентируясь на «условного» человека по ФАО ООН [12]: массой 70 кг и ростом 170 см. Однако для жилых и общественных зданий небольшого объема, к которым можно отнести здания школ, взаимосвязь системы обеспечения микроклимата и конструкций наружной оболочки здания должна быть рассчитана не на «условного», а на конкретного человека с его субъективными показателями [12, 18–20]. Существующие методы определения величин бытовых тепlopоступлений в зданиях школ [13] дают различные значения показателей бытовых тепlopоступлений, что не позволяет однозначно оценить их влияние на тепловой баланс зданий школьных учреждений. Дополнительная сложность заключается в определении количества тепла, выделяемого одним человеком, т. к. эти расчеты относят к задачам медицины.

Цель исследования состоит в определении величины бытовых тепlopоступлений от учащихся в зданиях образовательных организаций.

Методы исследования

Относительное постоянство температуры тела у человека обеспечивается механизмами терморегуляции, которые позволяют поддерживать температуру тела независимо от колебаний температуры окружающей среды. Это постоянство позволяет метаболическим процессам протекать с постоянной скоростью, дает возможность животным и человеку оставаться одинаково активными и в холодном, и в жарком климате. Диапазон температур, в которых человек может функционировать, достаточно узок, т. к. практически все погибают при температуре тела 40–45 °С. Поэтому определение теплового состояния в условиях теплового комфорта – такого нейтрального состояния, при котором механизмы терморегуляции не испытывают напряжения под влиянием факторов окружающей среды, является очень важным фактором, который необходимо учитывать при проектировании и в процессе эксплуатации зданий. Рассмотрим три методики определения тепlopоступлений от людей:

- 1) по средневзвешенной температуре кожи [6];
- 2) с учетом мощности метаболических процессов [6];
- 3) по методике Фангера [14].

Определение тепlopоступлений от людей по средневзвешенной температуре кожи человека

Тепло, которое вырабатывается в организме в условиях равновесия, отдается в окружающую среду поверхностью тела человека. Температура кожи человека в состоянии теплового комфорта на разных участках тела различна. Исходя из этого, экспериментально установлено, что максимально точно можно охарактеризовать тепловое состояние по средневзвешенной температуре кожи (СВТК), определяемой по формуле

$$\text{СВТК} = \frac{t_1 S_1 + t_2 S_2 + \dots + t_n S_n}{S}, \quad (1)$$

где n – число участков (точек) измерения температуры; t_n – температура n -участка тела; S_n – площадь n -участка поверхности тела с температурой, равной t_n .

Существуют различные варианты выбора точек для измерения температуры поверхности тела человека, и их не менее 15. Связь между тепловыми ощущениями и СВТК можно пронаблюдать по данным табл. 1, которые были получены в ходе многочисленных исследований посредством опроса испытуемых, измерения температуры кожи и температуры окружающей среды [15].

Таблица 1

Средневзвешенная температура кожи и влагопотери при относительном покое

Теплоощущения	СВТК, °C	Потери влаги, г/ч
Очень жарко	$\geq 36,0$	500–2000, значительная часть пота стекает
Жарко	$36,0 \pm 0,6$	250–500, значительная часть пота стекает
Тепло	$34,9 \pm 0,7$	60–250, пот не стекает
Комфорт	$33,2 \pm 1,0$	50 ± 10 , пот не выделяется
Прохладно	$31,1 \pm 1,0$	40, пот не выделяется
Холодно	$29,1 \pm 1,0$ ($27,9 \pm 1,5$)	Влагопотери как показатель теплоощущений нехарактерны
Очень холодно	Ниже 28,1 (26,4 и ниже)	

Зависимость температуры кожи от тепловых условий среды позволяет считать СВТК одним из показателей теплового комфорта. Таким образом, зная СВТК, можно определить количество тепла, выделяемого человеком, по формуле

$$Q = \alpha \cdot S(\text{СВТК} - t_b), \quad (2)$$

где S – площадь поверхности тела человека, м^2 ; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; t_b – температура внутреннего воздуха, $^\circ\text{C}$.

Определение тепlopоступлений от людей с учетом мощности метаболических процессов

Согласно второму закону термодинамики, все процессы превращения энергии протекают с рассеиванием энергии в виде тепла. Следовательно, теп-

лота поступает только из областей с более высокой температурой в область с более низкой. Таким образом, тепловая энергия от человека к окружающей среде передается при условии, что температура тела человека выше температуры среды.

В расчетах энергетических процессов теплообмена между человеком и окружающей средой важную роль играет метаболическое тепло.

Метаболическая тепловая энергия может быть определена по формуле

$$M = b \cdot k \cdot \frac{V_{O_2}}{S}, \quad (3)$$

где V_{O_2} – потребление кислорода, л/ч; k – коэффициент, меняющийся от 0,83 (для отдыха) до 1 (для тяжелого физического труда); $b = 5,8$ Вт·ч/л – энергетический эквивалент 1 л кислорода; S – площадь поверхности тела человека, м².

Обмен веществ в состоянии умственного или физического покоя, когда активно работают только внутренние органы человека, считается основным обменом веществ [6], средняя интенсивность которого у взрослого человека равна 1800 ккал/сут или $W_{00} = 88$ Вт. Но в зависимости от видов нагрузок на организм человека различают три основные категории видов деятельности. Согласно ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», классификация интенсивности трудовой деятельности представлена в табл. 2.

Таблица 2

Разграничение работ по тяжести на основе общих энергозатрат организма

Категория работ	Энергозатраты, Вт
Легкие физические работы (категория I)	
Ia – работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением	139
Iб – работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением	140–174
Средней тяжести физические работы (категория II)	
IIa – работы, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения	175–232
IIб – работы, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением	233–290
Тяжелые физические работы (категория III)	
III – работы, связанные с постоянными передвижениями, перемещением и переноской значительных (свыше 10 кг) тяжестей и требующие больших физических усилий	Более 290

С учетом вышеизложенного наиболее точно взаимосвязь человека с окружающей средой можно представить в виде схемы [6] на рис. 1.



Рис. 1. Взаимосвязь человека с окружающей средой

Определение теплоступлений от людей по методике Фангера

Одна из наиболее точных методик оценивания показателей микроклимата была разработана П.О. Фангером [6, 9–11]. Эта методика впоследствии была положена в основу международного стандарта ISO 7730 и Standard ASHRAE 55. Согласно теории Фангера, температурный комфорт основывается на понятии «теплого баланса тела человека». При температуре тела 37 °C наступает баланс между выработанной энергией и энергетическими потерями организма [14]. Это описано уравнением

$$S - M \pm W \pm R \pm C \pm K - E - RES = 0, \quad (4)$$

где S – накопленное тепло; M – метаболизм; W – внешняя работа; R – теплообмен путем радиации; C – конвективный теплообмен; K – кондуктивный теплообмен; E – теплообмен за счет испарений; RES – теплообмен за счет дыхательной деятельности (респирации).

В модели Фангера отображена взаимосвязь между показателями микроклимата замкнутых помещений [14]:

PMV – усредненный предсказуемый показатель теплового комфорта;

PPD – предсказуемый процент неудовлетворенных температурой помещения лиц.

При этом взаимосвязь PMV и тепловой нагрузки на человека отражена в следующей формуле [14]:

$$PMV = 3,155(0,303e^{-0,114M} + 0,028)L, \quad (5)$$

где M – уровень метаболической генерации тепла в зависимости от двигательной активности, met (1 met = 58,1 Вт/м²); L – разница между производимым внутренним теплом человека и потерями в окружающую среду.

$$L = q_{met,heat} - f_{cl} \cdot h_c(T_{cl} - T_a) - f_{cl} \cdot h_F(T_{cl} - T_F) - 156(w_{sk} - w_a) - 0,142(q_{met,heat} - 18,43) - 0,00077M(93,2 - T_a) - 2,78M(0,0365 - w_a), \quad (6)$$

где T_{cl} – средняя температура поверхности тела человека в одежде, °F; f_{cl} – отношение площади закрытой части тела к площади поверхности тела; T_a – температура воздуха, °F; h_c – коэффициент конвективного теплопереноса, Btu/ft²·°F·h; h_F – коэффициент радиационного теплопереноса, Btu/ft²·°F·h;

w_a – отношение влажности воздуха; w_{sk} – отношение насыщенной влажности при заданной температуре кожи.

Результаты

Согласно методике определения тепlopоступлений СВТК, была определена площадь поверхности тела (ППТ или BSA – body surface area) ребенка возрастом от 11 до 15 лет со следующими параметрами: рост 150 см, вес 45 кг. Для получения достоверных результатов вычисления производились по формулам Мостеллера (7а) и Костеффа (7б), м²:

$$BSA = \sqrt{\frac{(H \cdot P)}{3600}} = 1,36 ; \quad (7a)$$

$$BSA = \frac{4 \cdot P + 7}{P + 90} = 1,38 , \quad (7b)$$

где H – рост, см; P – вес, кг.

Площадь отдельных участков тела человека соответствует их площади поверхности и определена по «правилу девяток» [16]:

- голова и шея – 18 %;
- верхние конечности – каждая по 9 %;
- нижние конечности и стопы – каждая по 14 %;
- передняя часть туловища (грудь и живот) – 18 %;
- задняя часть туловища (спина + поясница и ягодицы) – 18 %.

На основе полученных данных была определена СВТК для ребенка, которая составила 31,2 °С. Следовательно, тепlopоступления от ребенка возрастом 11–15 лет составят $Q = 108,2$ Вт.

Согласно методике определения тепlopоступлений от людей по мощности метаболических процессов, установлено, что интенсивность обмена веществ у детей от 11 до 15 лет составляют 32 ккал на 1 кг веса в сутки (Савченков Ю.И., Шилов С.Н., Солдатова О.Г. Возрастная физиология. Физиологические особенности детей и подростков. Москва: Владос, 2013. 143 с.). Таким образом, основной обмен веществ для этой возрастной категории составит 1536 ккал или $W_{00} = 75$ Вт. Тогда на основе нормативов ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» будут определены энергозатраты для категорий работ (табл. 3).

Таблица 3

Разграничение работ по тяжести на основе общих энергозатрат организма (для детей возрастом 11–15 лет)

Категория работ	Энергозатраты, Вт
Легкие физические работы (категория I)	
Ia – работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением	117
Iб – работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением	134

Окончание табл. 3

Категория работ	Энергозатраты, Вт
Средней тяжести физические работы (категория II)	
Па – работы, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения	174

Согласно методике Фангера, по уровню метаболической генерации тепла в зависимости от двигательной активности в состоянии абсолютного покоя величина метаболических тепловых потерь для ребенка возрастом 11–15 лет при установленной температуре $T_{cl} = 89,6$ °F, температуре воздуха $T_a = 68$ °F (что соответствует температуре 20 °C), установленной влажности воздуха в помещении 55 %, что соответствует нормативному показателю, составила 80,2 Вт. При умственной активности учащегося, которая характерна для проведения учебного процесса, при всех тех же исходных данных тепlopоступления от ребенка составят 125 Вт.

Заключение

Согласно представленным методикам по определению тепlopоступлений от человека, установлено, что нормируются величины тепlopоступлений от «условного» человека с параметрами $m = 70$ кг и $h = 170$ см [12], что не соответствует параметрам детей школьного возраста. В ходе работы были определены величины тепlopоступлений от детей школьного возраста от 11 до 15 лет.

На основе данных рассмотренных выше методик были получены величины тепlopоступлений от детей с параметрами, соответствующими возрасту от 11 до 15 лет:

1. Методика определения тепlopоступлений СВТК – 108,2 Вт.
2. Методика определения тепlopоступлений от людей с учетом мощности метаболических процессов – 117 Вт.
3. Методика Фангера – 125 Вт.

Разница между значениями бытовых тепlopоступлений от детей по рассмотренным методикам составляет от 8 до 15 %.

Для определения наиболее точного значения величины бытовых тепlopоступлений от детей в образовательных организациях сравним данные теоретических исследований с данными, полученными в ходе натурного исследования температурного режима помещений зданий образовательных организаций [13].

На основании натурного исследования температурного режима учебного помещения во время учебного процесса, проведенного в образовательном здании в зимний период года, был установлен прирост температуры, который составил 4 °C для класса площадью 48 м² и количеством присутствующих детей 20 чел. На основе данных натурного исследования были определены тепlopоступления от детей, находящихся в помещении в период рабочего дня [17]. Тепlopоступления от присутствующих учащихся в учебном помещении составили 2268,6 Вт, на од-

ного человека – 113,4 Вт. На рис. 2 приведена диаграмма сравнения величин тепlopоступлений от учащихся в образовательных организациях по рассмотренным методикам расчета с данными натурного исследования.

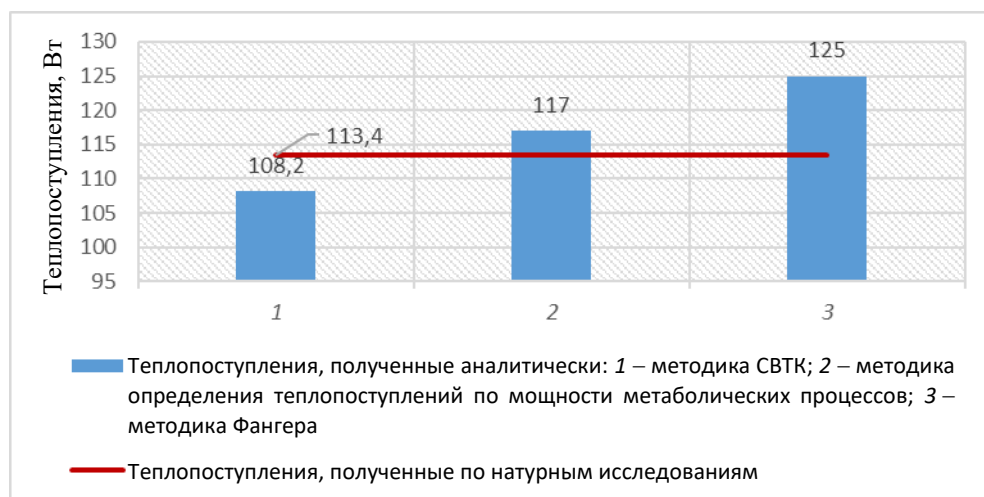


Рис. 2. Диаграмма сравнения величин тепlopоступлений от учащихся в учебном помещении

Анализируя данные, представленные на рис. 2, можно сделать следующие выводы:

1. Данные, полученные в ходе расчета по методике СВТК, отличаются от данных, полученных по натурным исследованиям, на 5 %.
2. Разница между данными, полученными по методике определения тепlopоступлений от людей с учетом мощности метаболических процессов, и по натурным исследованиям составляет 3 %.
3. Данные по методике Фангера и по натурным исследованиям отличаются на 10 %.

Следовательно, можно сделать вывод, что наибольшую сходимость с данными натурных исследований показывают данные, рассчитанные по методике определения тепlopоступлений от людей по мощности метаболических процессов с разницей 3 %, а величину тепlopоступлений, равную 117 Вт, предлагается использовать в расчетах при аналитических исследованиях бытовых тепlopоступлений от детей в зданиях образовательных организаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов О.Е. Теплотехнический расчет ограждающих конструкций. Москва ; Ленинград : Госстройиздат, 1933. 46 с.
2. Мачинский В.Д. Теплотехнические основы гражданского строительства. Москва : Госстройиздат, 1933. 312 с.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд., пересмотр. Москва : АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
4. Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. 160 с.

5. Шкловер А.М., Васильев Б.Ф., Уиков Ф.В. Основы строительной теплотехники. Москва : Госстройиздат, 1956. 350 с.
6. Тимофеева Е.И., Федорович Г.В. Экологический мониторинг параметров микроклимата. Москва, 2005. 194 с.
7. Банхиди Л. Тепловой микроклимат помещений: расчет комфортных параметров по теплоощущениям человека / пер. с венг. В.М. Беляева ; под ред. В.И. Прохорова, А.Л. Наумова. Москва : Стройиздат, 1981. 248 с.
8. Человек. Медико-биологические данные : доклад рабочей группы комитета II МКРЗ по условному человеку : пер. с англ. Москва : Медицина, 1977. 496 с.
9. Фангер П. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: в поисках совершенства // АВОК. 2000. № 2. С. 14–21.
10. Фангер П. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: влияние на комфорт, производительность и здоровье людей // АВОК. 2003. № 4. С. 12–21.
11. Fanger P.O. Thermal Comfort. McGraw Hill, 1970.
12. Лобанов Д.В., Шичкин В.В. Учет комплекса параметров при оценке состояния микроклимата в помещении // Научный журнал ВГТУ. Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2017. № 4 (3). С. 70–75.
13. Белоус А.Н., Оверченко М.В. Исследование бытовых тепlopоступлений в образовательных учреждениях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 6. С. 132–140. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-6-132-140>
14. Гусейнова М.В. Исследование возможности групповой оценки теплового комфорта по теории Фангера применительно ко множеству лиц с разными трудовыми показателями // Экология человека. 2019. № 4. С. 60–64.
15. Кричагин В.И. Принципы объективной оценки теплового состояния организма // Авиационная и космическая медицина / под ред. В.В. Парина. Москва, 1963. С. 310–314.
16. Wallace A.B., McGill M.Sc., Edin M.B. The exposure treatment of burns // The Lancet. 1951. 3 March. V. 257. I. 6653. P. 501–504.
17. 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
18. Hong S., Mylona A., Davies H., Ruyssevelt P., Mumovic D. Assessing the Trends of Energy Use of Public Non-Domestic Buildings in England and Wales // Building Services Engineering Research and Technology. 2019. V. 40. I. 2. P. 176–197.
19. Promoting energy efficiency standards and technologies to enhance energy efficiency in buildings // ECE Energy Series № 60. Geneva : United Nations, 2020. 64 p.
20. Физиология человека / под ред. Г.И. Косицкого. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Медицина, 1985. 544 с.
21. Seyed Amin Tabatabaei, Wim van der Ham, Michel C.A. Klein, Jan Treur. A Data Analysis Technique to Estimate the Thermal Characteristics of a House // Energies. 2017. 10(9). 1358. URL: <https://doi.org/10.3390/en10091358>
22. Turgay Coşkun, Cihan Turhan, Zeynep Durmuş Arsan, Gülden Gökçen Akkurt. The importance of internal heat gains for building cooling design // Journal of Thermal Engineering. 2017. V. 3. № 1. P. 1060–1064.
23. Dariusz Suszanowicz. Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems // E3S Web of Conferences 19. 2017. 01024.

REFERENCES

1. Vlasov O.E. Teplotekhnicheskii raschet ogradhdayushchikh konstruktov [Thermal analysis of building envelopes]. Moscow; Leningrad: Gosstroizdat, 1933. 46 p. (rus)
2. Machinskii V.D. Teplotekhnicheskie osnovy grazhdanskogo stroitel'stva [Thermal fundamentals of civil engineering]. Moscow: Gosstroizdat, 1933. 312 p. (rus)
3. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ogradhdayushchikh chastei zdaniy [Heat engineering of building envelopes], 5th ed., Yu.A. Tabunshchikov, V.G. Gagarin, Eds. Moscow: AVOK-PRESS, 2006. 256 p. (rus)

4. Shklover A.M. Teploperedacha pri periodicheskikh teplovykh vozdeistviyakh [Heat transfer under periodic thermal impacts]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. 160 p. (rus)
5. Shklover A.M., Vasil'ev B.F., Ushkov F.V. Osnovy stroitel'noi teplotekhniki [Principles of building heat engineering]. Moscow: Gosstroizdat, 1956. 350 p. (rus)
6. Timofeeva E.I., Fedorovich G.V. Ekologicheskii monitoring parametrov mikroklimata [Ecological monitoring of microclimate parameters]. Moscow, 2005. 194 p. (rus)
7. Bankhidi L. Teplovoi mikroklimat pomeshchenii: raschet komfortnykh parametrov po teploshchushcheniyam cheloveka [Thermal microclimate of premises: Comfort parameter calculation according to human thermal sensations]. V.I. Prokhorov, A.L. Naumov, Eds, Moscow: Stroizdat, 1981. 248 p. (transl. from Hung.)
8. Chelovek. Mediko-biologicheskie dannye: doklad rabochei gruppy komiteta II MKRZ po uslovnomu cheloveku [Man. Medico-biological data: Report of the Working Group of Committee II of the ICRP on Conditional Man]. Moscow: Meditsina, 1977. 496 p. (transl. from Engl.)
9. Fanger P. Kachestvo vnutrennego vozdukha v XXI veke: v poiskakh sovershenstva [Indoor air quality in the 21st century: In search of perfection]. AVOK. 2000. No. 2. Pp. 14–21. (rus)
10. Fanger P. Kachestvo vnutrennego vozdukha v XXI veke: vliyaniye na komfort, proizvoditel'nost' i zdorov'e lyudei [Indoor air quality in the 21st century: Effect on comfort, productivity, and health]. AVOK. 2003. No. 4. Pp. 12–21. (rus)
11. Fanger P.O. Thermal comfort. McGraw Hill, 1970.
12. Lobanov D.V., Shichkin V.V. Uchet kompleksa parametrov pri otsenke sostoyaniya mikroklimata v pomeshchenii [A set of parameters for assessing the room microclimate]. Zhilishchnoe khozyaistvo i kommunal'naya infrastruktura. 2017. No. 4 (3). Pp. 70–75. (rus)
13. Belous A.N., Overchenko M.V. Bytovye teplopоступления v obrazovatel'nykh uchrezhdeniyakh [Heat consumption in academic institutions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 132–140. (rus)
14. Guseinova M.V. Issledovanie vozmozhnosti gruppovoi otsenki teplovogo komforta po teorii Fanger'a primenitel'no ko mnozhestvu lits s raznymi trudovymi pokazatelyami [Group evaluation of thermal comfort by Fanger's theory applied to individuals with different work performance]. Ekologiya cheloveka. 2019. No. 4. Pp. 60–64. (rus)
15. Krichagin V.I. Printsipy ob"ektivnoi otsenki teplovogo sostoyaniya organizma [Principles of objective assessment of the body's thermal state]. In: Aviatsionnaya i kosmicheskaya meditsina, V.V. Parin, Ed. Moscow, 1963. Pp. 310–314. (rus)
16. Wallace A.B., McGill M.Sc., Edin M.B. The exposure treatment of burns. *The Lancet*. 1951. 3 March. V. 257. No. 6653. Pp. 501–504.
17. Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Perenosnoi teplotekhnicheskii 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. (rus)
18. Hong S., Mylona A., Davies H., Ruyssevelt P., Mumovic D. Assessing the trends of energy use of public non-domestic buildings in England and Wales. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2019. V. 40. No. 2. Pp. 176–197.
19. Promoting energy efficiency standards and technologies to enhance energy efficiency in buildings. *ECE Energy Series*. 2020. No. 60. 64 p.
20. Kositskii G.I. (Ed.) Fiziologiya cheloveka [Human physiology], 3rd ed., Moscow: Meditsina, 1985. 544 p. (rus)
21. Seyed Amin Tabatabaei, Wim van der Ham, Michel C.A. Klein, Jan Treur. A data analysis technique to estimate the thermal characteristics of a house. *Energies*. 2017. 10 (9). 1358. DOI: 10.3390/en10091358
22. Turgay Coşkun, Cihan Turhan, Zeynep Durmuş Arsan, Gül den Gökçen Akkurt. The importance of internal heat gains for building cooling design. *Journal of Thermal Engineering*. 2017. V. 3. No. 1. Pp. 1060–1064.
23. Dariusz Suszanowicz. Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems. *E3S Web of Conferences*. 2017. V. 19. 01024.

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@ua.ru

Оверченко Мира Викторовна, ассистент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, miro4ka8@mail.ru

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@ua.ru

Mira V. Overchenko, Assistant Lecturer, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, miro4ka8@mail.ru

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.543

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176

*Е.В. ВОРОБЬЕВА,
Рязанский институт (филиал)
Московского политехнического университета*

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛОИДНЫХ СВОЙСТВ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ИХ ОЧИСТКИ

Аннотация. Нефтеперерабатывающие и другие промышленные предприятия города образуют большое количество сточных вод, загрязненных нефтепродуктами. Прежде чем сбросить в водоем подобные стоки, необходимо провести их очистку. Анализ публикаций по данной теме показал, что используемые методы очистки часто не снижают количество нефтепродуктов до значений ПДК. Это объясняется особенностью данных стоков. Они представляют собой микрогетерогенные системы, характеризующиеся переменным составом и высокой стабильностью. Исследование факторов, влияющих на высокую агрегативную устойчивость стоков, а также оптимизация применяемых методов очистки от указанных примесей весьма актуальны.

В ходе исследования были изучены свойства многокомпонентных эмульсионных систем, факторов, влияющих на их высокую агрегативную устойчивость, а также разработаны теоретические основы оптимизации очистки сточных вод от указанных примесей.

Исследовались системы, моделирующие промышленные стоки по основному химическому составу, полученные диспергационным методом. Также проводились исследования кинетики извлечения нефтепродуктов, изучение зависимости устойчивости эмульсий от ряда параметров технологического режима очистки воды в условиях интенсивного перемешивания эмульсии воздухом.

Использовался экспресс-метод определения содержания нефтепродуктов в эмульсиях. Результаты зависимости оптической плотности (D) от содержания нефтепродуктов подверглись регрессионному анализу.

В ходе работы установлено, что удаление частиц диаметром более 10^{-6} мкм продолжается в течение 20 мин, что соответствует этапу быстрой коагуляции. Устойчивость образцов «условно чистых» эмульсий уменьшалась примерно в 10 раз при увеличении скорости барботажа до 30 л/ч. При использовании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ было достаточно скорости барботажа 10 л/ч.

Ключевые слова: сточные воды, пневмосепарация, устойчивость эмульсий, нефтесодержащие стоки, коагуляция, агрегативная устойчивость, гидродинамический режим

Для цитирования: Воробьева Е.В. Исследование коллоидных свойств нефтезагрязненных сточных вод и разработка способов их очистки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 165–176.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176

E.V. VOROBYEVA,
Ryazan Institute (Branch) of Moscow Polytechnic University

COLLOIDAL PROPERTIES OF OIL-CONTAMINATED SEWAGE AND ITS TREATMENT

Abstract. Oil refineries and other industrial enterprises generate a large amount of sewage contaminated with petroleum products. Sewage must be treated before it can be discharged into a water body. Sewage treatment methods often do not allow reducing the content of petroleum products to the maximum allowable values. This is because sewage is a microheterogeneous system characterized by variable composition and high stability. It is thus important to study factors affecting the high aggregate stability of sewage as well as the development of theoretical foundations for optimizing sewage treatment.

The paper presents the study of properties of multicomponent colloidal emulsion systems, factors affecting their high aggregative stability and develops theoretical foundations for optimizing sewage treatment. The systems simulating industrial effluents according to the basic chemical composition obtained by the dispersion method are studied herein. Research also includes the kinetics of precipitation of petroleum products from sewage, sewage treatment parameters during the intensive mixing of the emulsion with air.

The express-method determination is used for the petroleum product content in emulsions. The regression analysis is used for the dependence of the optical density on the content of petroleum products. It is found that 10-6 μm particle removal continues for 20 min, which corresponds to the rapid coagulation. The stability of clean-contaminated emulsions decreases by about 10 times with increasing barbotage speed to 30 l/h. The latter being 10 l/h, is sufficient when using $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Keywords: sewage, air separation, emulsion stability, oil-contaminated sewage, coagulation, aggregative stability, hydrodynamic conditions

For citation: Vorob'eva E.V. Issledovanie kolloidnykh svoystv neftezagryaznennykh stochnykh vod i razrabotka sposobov ikh ochistki [Colloidal properties of oil-contaminated sewage and its treatment]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 165–176.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176

Одна из проблем защиты окружающей природной среды – это охрана поверхностных вод от загрязнений промышленными сточными водами. Нефтеперерабатывающие и другие промышленные предприятия города образуют большие количества сточных вод, загрязненных нефтепродуктами. Сброс недостаточно очищенных стоков ведет к увеличению концентраций отдельных токсичных компонентов, повышению фоновых значений органических веществ, ухудшению санитарно-гигиенического состояния водного бассейна. Все это является причиной ухудшения экологической обстановки.

Негативное воздействие оказывают промышленные стоки нефтеперерабатывающих предприятий. Они содержат микрогетерогенные системы, харак-

теризующиеся переменным составом, обуславливающим различные физические и химические свойства [1–3]. Состав обусловлен производимыми товарами. Это автомобильное, дизельное, котельное топливо и смазочные материалы, а также антидетонационные присадки. Прежде чем вернуть подобные стоки в замкнутый технологический цикл или сбросить в водоем, необходимо провести их очистку.

Анализ публикаций по данной теме показал, что используемые методы очистки не позволяют добиться значений ПДК, кроме того, станции очистки занимают огромные территории, дорогостоящи и требуют обслуживания. Нефтепродукты в воде находятся в грубодисперсном состоянии и по причине меньшей плотности легко выделяются на поверхности в виде пленки [4–8]. Часть нефтепродуктов находится в тонкодисперсном состоянии, образуя эмульсию «нефтепродукт в воде», в которой дисперсная фаза представлена нефтепродуктами, а дисперсионная среда – водой.

Данные коллоидные системы образуются на всех стадиях переработки нефти, ее разогреве, перекачке насосами, а также при промыве оборудования, влажной уборке производственных территорий и сбросе в канализацию. Они характеризуются высокой устойчивостью благодаря кинетическим свойствам, небольшой концентрации и поверхностному натяжению. Механические примеси, ионы, содержащиеся в воде, покрывают капельки нефти, стабилизируя эмульсии [9, 10].

Для уменьшения содержания нефтепродуктов в стоках необходимо удалить загрязнения, находящиеся в грубодисперсном и эмульсионном состоянии, провести доочистку от высокодисперсных растворимых составляющих. Данные, полученные в ходе изучения литературы по данному направлению и лабораторных журналов станций очистки предприятий, позволили выявить недостатки применяемых методов очистки [9–12]. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Недостатки существующих методов очистки сточных вод
от нефтепродуктов**

Метод очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, до очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, после очистки	Недостатки
Многоярусная нефтеловушка	24 000	186	Невозможность очистки от эмульсионных нефтепродуктов
Гидроциклон	1000	60	Недостаточная степень очистки
Зернистый фильтр	80	20	Необходимость периодической смены фильтровального материала

Окончание табл. 1

Метод очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, до очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, после очистки	Недостатки
Пенополиуретановый фильтр	150	10	Необходимость периодической смены фильтровального материала
Напорный флотатор	150	30	Недостаточная степень очистки
Импеллерный флотатор	150	25	Невозможность использования коагулянта, недостаточная степень очистки
Электрофлотатор	50 000	500	Применим для небольших расходов сточных вод с высоким солесодержанием
Электрокоагуляция	300	3	Большой расход электроэнергии
Виброакустическое воздействие	400	1	Сложность реализации
Адсорбция: сорбент МИУ + активированный уголь	5	0,15	Недостаточная степень очистки
Адсорбция: шунгитовая порода	1–5	0,05	Снижение pH, невозможность удаления аммонийного азота, сульфидов
Озонирование	12–15	6–8 – I ступень 2–3 – II ступень	Недостаточная степень очистки
Аэротенк	10	1,5	Недостаточная степень очистки
Обратный осмос	0,5	0,05	Введение предварительной очистки от взвешенных веществ, стадии ультрафильтрации

Для безопасного сброса в водоем стоков концентрация нефтепродуктов должна быть $\leq 0,05$ мг/л. Применяемые в настоящее время технологии в большинстве случаев не могут достичь требуемых показателей, поэтому

разработка дополнительных методов доочистки промышленных стоков весьма актуальна.

Целью настоящих исследований являлось изучение свойств многокомпонентных систем эмульсионного типа, факторов, влияющих на их высокую агрегативную устойчивость, а также разработка теоретических основ оптимизации очистки сточных вод от указанных примесей.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- 1) усовершенствовать методики создания водных эмульсий различных нефтепродуктов типа М/В («масло – вода») и модели промышленных стоков;
- 2) определить устойчивость эмульсий в зависимости от pH водной среды и от присутствия электролитов в качестве коагулянтов;
- 3) изучить кинетику и механизм коагуляции эмульсий в различных условиях.

Были исследованы «условно чистые» эмульсии, содержащие различные нефтепродукты: масла, мазут и бензин, их характерной особенностью являлось отсутствие электролитов, растворенных в воде [9–12].

Также в лаборатории исследовались модели промышленных стоков по основному химическому составу, называемые в дальнейшем «модельными» эмульсиями. Для их приготовления брались различные образцы нефтепродуктов, растворы солей аммония. Все это подвергалось диспергированию, также добавлением соответствующих растворов (гидроксид кальция) достигалось $\text{pH} \approx 8$.

Для достижения устойчивости системы «масло – вода» необходимо измельчить дисперсную фазу, чтобы диаметр частиц был 0,1–10,0 мкм. Поэтому условием получения эмульсий было диспергирование нефтепродукта в воде. В результате получалась эмульсия, способная не расслаиваться и сохранять концентрацию примесей на протяжении трех дней.

Количественная характеристика степени очистки определялась следующим образом:

$$\alpha = \frac{C_0 - C}{C_0},$$

где C_0 – концентрация нефтепродуктов в начале опыта; C – концентрация нефтепродуктов по окончании опыта.

Устойчивость эмульсии Y определяли по формуле

$$Y = 1 - \alpha.$$

Для устойчивых образцов эмульсий характерно: $\alpha = 0$ и $Y = 1$.

В ходе эксперимента был сделан вывод, что при условии, когда $Y > 0,96$, эмульсия устойчива.

Установлено, что для образования устойчивых эмульсий необходима скорость вращения пропеллерной мешалки $v_{\text{меш}} \geq 2000$ об/мин, а время перемешивания ≈ 1 ч.

Содержание нефтепродуктов в модельных эмульсиях оценивалось по их оптической плотности (D) фотоэлектроколориметрическим методом. Использовался экспресс-метод анализа содержания нефтепродуктов в эмульсиях, позволяющий отказаться от предварительной экстракции четыреххлористым уг-

леродом. Для анализа брался «Судан-3», способный экстрагироваться дисперсными частицами. Результаты зависимости оптической плотности (D) от содержания нефтепродуктов подверглись регрессионному анализу [13–16]. В результате было установлено, что наиболее приемлемой является линейная функция в широком диапазоне концентраций нефтепродуктов $C_{н-п}$:

$$D = a + b C_{н-п}.$$

В случае $C_{н-п} > 50$ мг/л возрастает ошибка исследований. Рекомендуется довести эмульсию до $C_{н-п} < 50$ мг/л и учесть коэффициент разбавления при расчете.

Далее проводились исследования кинетики осаждения нефтепродуктов из сточных вод, заключающиеся в измерении обводненности, расхода эмульсии, плотности воды и нефти. Для этого исследуемый образец помещался в химический мерный стакан, фиксировалась длительность осаждения и измерялась толщина образовавшегося нефтяного слоя. Измерения проводили каждые 0,5–1 мин и далее каждые 10 мин.

Была получена зависимость скорости всплытия нефти от диаметра частиц и уравнение $u = 0,0493e^{-0,025d}$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,8349$.

Полученные данные позволили сделать вывод, что удаление частиц диаметром более 10^{-6} мкм продолжается в течение 20 мин, что соответствует этапу быстрой коагуляции (рис. 1).

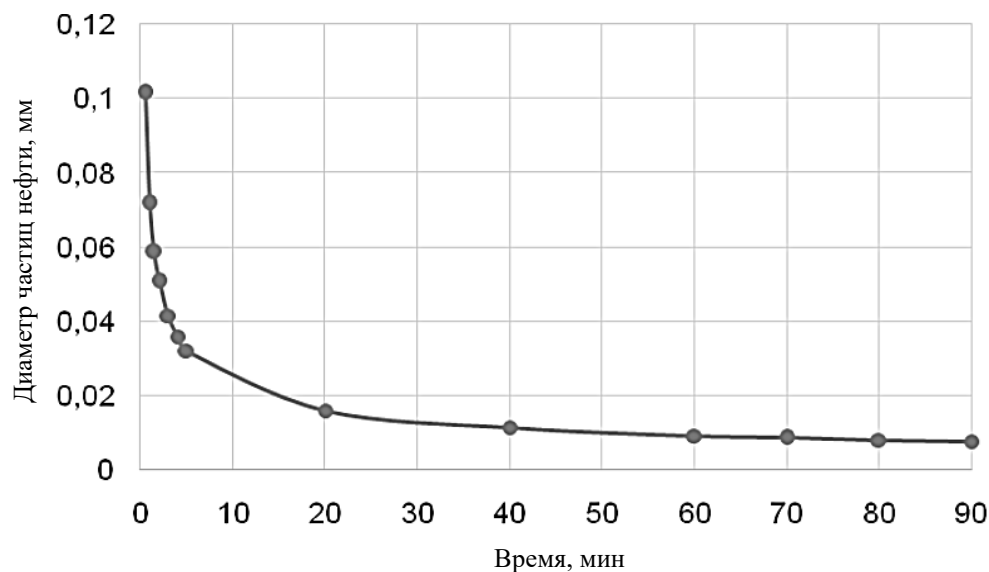


Рис. 1. Зависимость величины частиц нефти от времени их осаждения

Следующим этапом исследований было изучение зависимости устойчивости эмульсий от ряда параметров технологического режима очистки воды в условиях интенсивного перемешивания эмульсии воздухом (барботажа) с размерами пузырьков 1–2 мм при скорости потока газа 10–50 л/ч. Для ис-

следования брались «условно чистые» и многокомпонентные эмульсии, моделирующие промышленные стоки («модельные»).

Определялась устойчивость Y образцов «условно чистых» и «модельных» эмульсий и величин $t_{\text{макс}}$ при различных скоростях барботажа и наличии $\text{Ca}(\text{OH})_2$, варьировалась реакция среды от 3 до 10. Для изменения электропроводности добавляли раствор NaCl с концентрацией 0,1н. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

**Зависимость Y от объемной скорости потока газа
при различных значениях pH без добавления $\text{Ca}(\text{OH})_2$
и при его присутствии**

Эмульсия	Скорость потока газа, л/ч	pH = 3	pH = 4	pH = 7	pH = 9	pH = 10
«Условно чистая» Y , время, мин	10	0,15; 90	0,17; 90	0,75; 120	0,22; 100	0,20; 100
	30	0,10; 75	0,12; 75	0,75; 90	0,16; 90	0,13; 90
	50	0,10; 45	0,12; 45	0,65; 75	0,16; 60	0,13; 60
«Модельная» Y , время, мин	10	0,40; 90	0,55; 90	0,90; 120	0,42; 120	0,40; 120
	30	0,36; 75	0,50; 75	0,84; 100	0,38; 90	0,35; 90
	50	0,34; 60	0,46; 60	0,90; 90	0,36; 75	0,33; 75
«Условно чистая» + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Y , время, мин	10	0,10; 90	0,11; 90	0,20; 120	0,16; 100	0,13; 100
	30	0,05; 75	0,06; 75	0,11; 90	0,09; 90	0,08; 90
	50	0,05; 45	0,06; 45	0,11; 75	0,10; 60	0,08; 60
«Модельная» + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Y , время, мин	10	0,20; 90	0,22; 90	0,58; 120	0,28; 120	0,25; 120
	30	0,16; 75	0,20; 75	0,50; 100	0,20; 90	0,18; 90
	50	0,16; 60	0,20; 60	0,49; 90	0,20; 75	0,18; 75

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

– устойчивость образцов «условно чистых» эмульсий уменьшалась примерно в 10 раз при увеличении скорости барботажа до 30 л/ч. При использовании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ было достаточно скорости барботажа 10 л/ч;

– более высокая устойчивость «модельных» эмульсий объясняется наличием в стоках примесей ПАВ и пылевидной фракции пустой породы, являющихся стабилизаторами коллоидной структуры;

– в процессе исследований было замечено, что значения водородного показателя отличаются от тех, которые должны быть при добавлении данных количеств щелочей и кислот (табл. 3 и 4).

Данное явление связано с адсорбцией на поверхности дисперсной фазы ионов H_3O^+ в кислой области pH или ионов OH^- в щелочной области в процессе образования эмульсий. После очистки от нефтепродукта значение реакции

среды становится прежним. Ближе к значениям нейтральной среды устойчивость эмульсий возрастает.

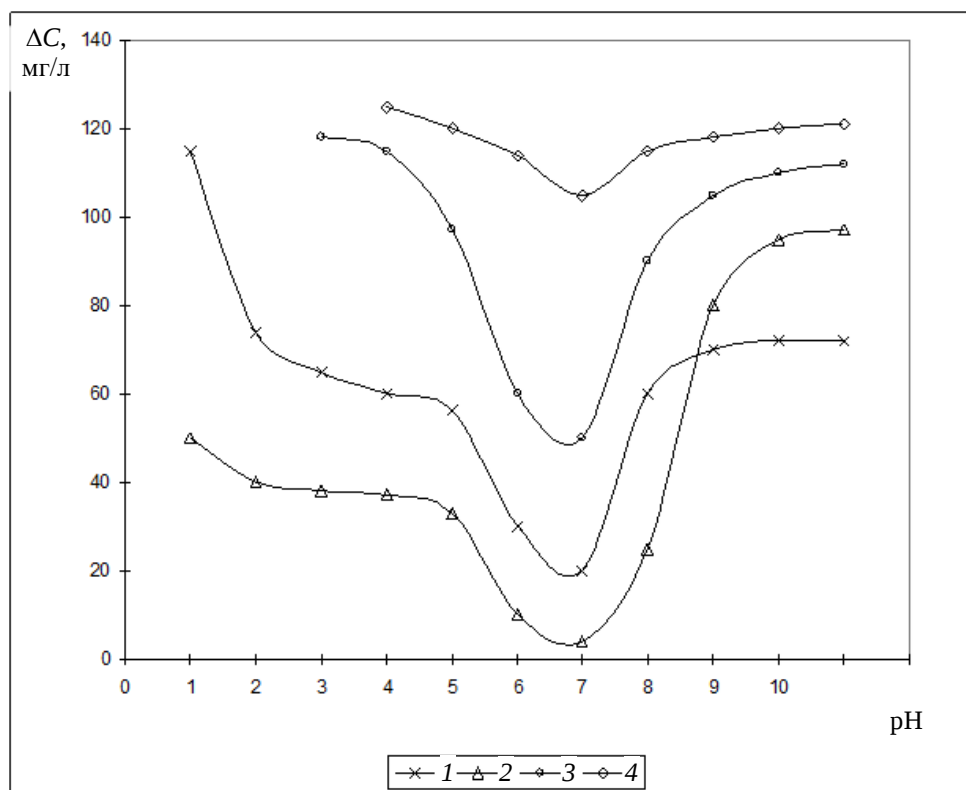


Рис. 2. Зависимость изменения содержания нефтепродуктов от значений pH:
1 и 2 – «модельные» без и в присутствии 0,1 ммоль/л $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 3 и 4 – «условно чистые» без и в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Таблица 3

Изменение pH во времени, $C_{\text{н-п}} = 100$ мг/л

№ п/п	t, ч	pH = 3	pH = 3,7	pH = 4,2	pH = 4,7	pH = 8,2	pH = 9,2	pH = 9,6	pH = 10
pH (ср.)	0	3,412	3,764	4,160	4,599	8,220	8,823	9,349	9,532
	1	3,233	3,607	4,073	4,516	8,342	8,970	9,442	9,757
	2	3,00	3,50	4,00	4,50	8,50	9,00	9,50	10,00
δ_n	0	0,013	0,058	0,015	0,013	0,021	0,022	0,028	0,037
	1	0,034	0,014	0,053	0,021	0,046	0,069	0,048	0,063
	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4

Изменение pH во времени, $C_{н-п} = 130$ мг/л

№ п/п	t, ч	pH = 3	pH = 3,7	pH = 4,2	pH = 4,7	pH = 8,2	pH = 9,2	pH = 9,6	pH = 10
pH (ср.)	0	3,528	4,020	4,265	4,709	8,080	8,731	9,200	9,276
	1	3,255	3,710	4,145	4,560	8,302	8,970	9,310	9,470
	2	3,010	3,50	4,020	4,50	8,50	9,00	9,440	9,800
δ_n	0	0,127	0,040	0,032	0,014	0,071	0,019	0,063	0,021
	1	0,090	0,066	0,055	0,049	0,045	0,064	0,070	0,064
	2	0,030	0	0,040	0	0	0	0,120	0,100

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что адсорбция ионов H_3O^+ и OH^- стабилизирует эмульсии. Наряду с этим, устойчивость возрастает за счет ионов электролитов, проявляются гидрофильные свойства.

Следовательно, первым шагом в очистке нефтесодержащих стоков должно быть разрушение агрегативно устойчивых структур. Рекомендуется использовать активный гидродинамический режим, позволяющий сообщить энергию, необходимую для разрыва адсорбционных пленок, слияния капель нефтепродукта и их извлечения. При этом нужно учесть, что неприемлемо использование механических перемешивающих устройств, приводящих к дроблению капель нефтепродуктов и, как следствие, увеличению устойчивости эмульсии.

В качестве интенсификатора данного процесса можно использовать препараты на основе естественных природных соединений, например солей гуминовых кислот – гуматов, которые, обладая химической гетерогенностью и полидисперсностью, вступают в физико-химические взаимодействия с нефтепродуктами, влияя тем самым на эффективность очистных процессов.

Степень очистки стоков зависит от водородного показателя среды загрязненной воды. Это имеет большое значение, т. к. позволяет обеспечить удовлетворительную работу активного ила на этапе биологической очистки. Для эффективной биологической очистки требуется pH = 6,4–7,7, в щелочной среде снижается скорость обменных процессов активного ила.

Дополнительно были проведены исследования изменения реакции среды тестовых эмульсий в присутствии гуминового препарата. Применяемые методы очистки позволили снизить содержание нефтепродукта, а добавление гуматов привело к снижению значений pH до 7,5, что приемлемо для биологической очистки сточных вод.

Полученные в ходе исследования данные по кинетике удаления нефтепродуктов находятся в полном соответствии с теорией коагуляции жидкофазных коллоидных структур и характеризуются быстрым и медленным процессами. Этап быстрой фазы коагуляции длится примерно 20 мин, в результате удаляются частицы, характеризующиеся более крупным диаметром. Капли диа-

метром $\leq 10^{-6}$ мкм агрегативно устойчивы, им присуща меньшая кинетическая энергия, что снижает вероятность столкновений. В соответствии с этим время полного цикла их коагуляции составляет $\sim 1,5$ ч, но оптимальное время ~ 40 мин, далее проводить разделение экономически нецелесообразно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Домрачева В.А., Трусова В.В. Ресурсосберегающая технология очистки сточных вод от нефтепродуктов // Водочистка. 2015. № 5. С. 51–54.
2. Рубанов, Ю.К., Токач Ю.Е. Способ очистки сточных вод от эмульгированных нефтепродуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 6. С. 246–249.
3. Малышкина Е.С., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Использование природных сорбентов в процессе очистки воды от нефтепродуктов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 188–200.
4. Chen Z., Luo J., Hang X., Wan Y. Physicochemical characterization of tight nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment // Journal of Membrane Science. 2018. V. 547. P. 51–63.
5. Yamuna S.V., Graham A.G. Application of low-mixing energy for the coagulation process // Water Res. 2015. 84. P. 333–341.
6. Yu W.Z., Gregory J., Campos, L., Li G.B. The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth // Chem. Eng. Journ. 2011. 171. P. 425–430.
7. Nguyen Trung Duc, Nguyen Thanh Tung, Nguyen Van Khoi. Sorption Studies of Crude Oil on acetylated Sawdust // Journal of Science and Technology. 2016. 54 (2A). P. 201–206.
8. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the Effect of Particle Size on the Performance of Wood Based Adsorbent // Journal of Chemical Engineering & Process Technology. 2016. V. 7. P. 315.
9. Гальченко С.В., Чердакова А.С., Воробьева Е.В. Обоснование методики получения устойчивых эмульсий нефтепродуктов, содержащихся в сточных водах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2 (2). С. 313–318.
10. Воробьева Е.В. Химико-технологические и практические аспекты реализации метода пневмосепарации для очистки нефтесодержащих сточных вод // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 2. С. 71–75.
11. Чердакова А.С., Гальченко С.В., Воробьева Е.В. Результаты экспериментальной оценки влияния биопава на процессы микробиологической ремедиации нефтезагрязненных водных сред // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 1 (81). С. 74–83.
12. Гальченко С.В., Чердакова А.С., Спиридович Д.В. Результаты экспериментальной оценки влияния гуминовых препаратов на процессы диспергирования нефтепродуктов // Научное обозрение. 2015. № 1. С. 126–131.
13. Чердакова А.С., Гальченко С.В., Воробьева Е.В. Экспериментальная оценка влияния гуминовых препаратов на процессы микробиологической ремедиации почв, загрязненных нефтепродуктами // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 3. С. 30–35.
14. Лобанова М.С., Суджян К.М., Воробьева Е.В. Перспективы очистки сточных вод от нефтепродуктов сорбционным методом // Новые технологии в учебном процессе и производстве : материалы XVIII Международной научно-технической конференции. Рязань, 2020. С. 449–450.
15. Зубкова Е.В., Воробьева Е.В. Экологические аспекты использования установки тонкослойных модулей для доочистки сточных вод АО «РНПК» // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019 : сб. трудов II Международного научно-технического форума. В 10 томах / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань, 2019. С. 97–100.
16. Chapman D.S., Gunn I.D., Pringle H.E., Siriwardena G.M., Taylor P., Thackeray S.J., Willby N.J., Carvalho L. Invasion of freshwater ecosystems is promoted by network connectivity to hotspots of human activity // Global Ecology and Biogeography, 2020. V. 29. P. 645–655.

REFERENCES

1. Domracheva V.A., Trusova V.V. Resursosberegayushchaya tekhnologiya ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov [Resource-saving wastewater treatment technology for oil products]. *Vodoochistka*. 2015. No. 5. Pp. 51–54. (rus)
2. Rubanov Yu.K., Tokach Yu.E. Sposob ochistki stochnykh vod ot ehmul'girovannykh nefteproduktov [Method of wastewater treatment of emulsified petroleum products]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. V. 18. No. 6. Pp. 246–249. (rus)
3. Malyshkina E.S., Vyalkova E.I., Osipova E.Y. Ispol'zovanie prirodnnykh sorbentov v processe ochistki vody ot nefteproduktov [Water purification with natural sorbents]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 188–200. (rus)
4. Chen Z., Luo J., Hang X., Wan Y. Physicochemical characterization of tight nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. 2018. V. 547. Pp. 51–63.
5. Yamuna S.V., Graham A.G. Application of low-mixing energy for the coagulation process. *Water Research*. 2015. V. 84. Pp. 333–341.
6. Yu W.Z., Gregory J., Campos, L., Li G.B. The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth. *Chemical Engineering Journal*. 2011. V. 171. Pp. 425–430.
7. Nguyen Trung Duc, Nguyen Thanh Tung, Nguyen Van Khoi. Sorption studies of crude oil on acetylated sawdust. *Journal of Science and Technology*. 2016. V. 54 (2A). Pp. 201–206.
8. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the effect of particle size on the performance of wood based adsorbent. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2016. V. 7. P. 315.
9. Gal'chenko S.V., Cherdakova A.S., Vorobyeva E.V. Obosnovanie metodiki polucheniya ustojchivyykh ehmul'sij nefteproduktov, soderzhashchikhsya v stochnykh vodakh [Stable emulsion technology of petroleum products in wastewater]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2016. V. 18. No. 2 (2) Pp. 313–318. (rus)
10. Gal'chenko S.V., Vorobyeva E.V. Khimiko-tekhnologicheskie i prakticheskie aspekty realizatsii metoda pnevmoseparatsii dlya ochistki neftesoderzhashchikh stochnykh vod [Chemical-technological and practical aspects of air separation method implementation for oil-contaminated wastewater treatment]. *Ehnergoberezhenie i vodopodgotovka*. 2015. No. 2. Pp. 71–75. (rus)
11. Cherdakova A.S. Rezul'taty ehksperimental'noj ocenki vliyaniya biopav na processy mikrobiologicheskoy remediacii neftezagryaznennykh vodnykh sred [Experimental evaluation of the effect of bio-surfactants on microbiological remediation of oil-contaminated aqueous media]. *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya*. 2020. No. 1 (81). Pp. 74–83. (rus)
12. Gal'chenko S.V., Cherdakova A.S., Spiridovich D.V. Rezul'taty ehksperimental'noj ocenki vliyaniya guminovykh preparatov na processy dispergirovaniya nefteproduktov [Experimental evaluation of the effect of humic products on petroleum product dispersion]. *Nauchnoe obozrenie*. 2015. No. 1. Pp. 126–131. (rus)
13. Cherdakova A.S., Gal'chenko S.V., Vorobyeva E.V. Ehksperimental'naya ocenka vliyaniya guminovykh preparatov na processy mikrobiologicheskoy remediacii pochv, zagryaznennykh nefteproduktami [Experimental evaluation of the effect of humic products on microbiological remediation of soils contaminated with petroleum products]. *Ehkologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021. V. 25. No. 3. Pp. 30–35. (rus)
14. Lobanova M.S., Sudzhyan K.M., Vorobyeva E.V. Perspektivy ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov sorbionnym me-todom [Prospects of wastewater treatment from oil products by the sorption method]. In: *Novye tekhnologii v uchebno-m processse i proizvodstve. Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Proc. 18th Int. Sci. Conf. 'New Technologies in Learning and Production')*. Ryazan, 2020. Pp. 449–450. (rus)
15. Zubkova E.V., Vorobyeva E.V. Ehkologicheskie aspekty ispol'zovaniya ustanovki tonkoslojnykh modulej dlya doochistki stochnykh vod AO RNPk [Environmental aspects of using a thin-layer module unit for wastewater post-treatment]. In: *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Sbornik trudov II mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma*

- (Proc. 2nd Int. Sci. Forum 'Modern Technologies in Science and Education'), in 10 vol., O.V. Milovzorov, Ed. Ryazan, 2019. Pp. 97–100. (rus)
16. Chapman, D.S., Gunn I.D., Pringle H.E., Siriwardena G.M., Taylor P., Thackeray S.J., Willby N.J., Carvalho L. Invasion of freshwater ecosystems is promoted by network connectivity to hotspots of human activity. *Global Ecology and Biogeography*. 2020. V. 29. Pp. 645–655.

Сведения об авторе

Воробьева Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 390000, Россия, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53, vorobeva-70@bk.ru

Author Details

Elena V. Vorobyeva, PhD, A/Professor, Ryazan Institute (Branch) of Moscow Polytechnic University, 26/53, Pravo-Lybedskaya Str., Ryazan, 390000, Russia, vorobeva-70@bk.ru

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-177-187

С.В. ЮЩУБЕ, И.И. ПОДШИВАЛОВ, А.А. ТАРАСОВ,

Томский государственный архитектурно-строительный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕОБХОДИМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Аннотация. Объектом исследования является пятиэтажное протяженное кирпичное здание на свайном фундаменте, получившее значительные деформации.

Цель работы – восстановление эксплуатационной пригодности здания после выполнения инструментального обследования.

При строительстве, а затем и при эксплуатации здания, вследствие недопогружения отдельных свай до гравийно-галечникового слоя в сложных инженерно-геологических условиях площадки, была нарушена пространственная жесткость здания с образованием трещин в кирпичных стенах и в ростверке свайного фундамента.

По результатам обследования было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния здания в ПК MicroFe с разработкой расчетной модели в системе «основание – фундамент – здание».

Полученные результаты позволили разработать рекомендации по обеспечению необходимой пространственной жесткости здания путем усиления с внешней стороны наружных стен напрягаемыми стальными стержнями, расположенными в уровне междуэтажных перекрытий.

Ключевые слова: здание, стены, свайный фундамент, неравномерные осадки, деформации, расчетная модель, усиление, пространственная жесткость

Для цитирования: Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания на свайном фундаменте для обеспечения необходимой пространственной жесткости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 177–187.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-177-187

S.V. YUSHCHUBE, I.I. PODSHIVALOV, A.A. TARASOV,
Tomsk State University of Architecture and Building

STRESS-STRAIN STATE MODELING OF BRICK BUILDING ON PILE FOUNDATION TO PROVIDE SPATIAL RIGIDITY

Abstract. *Purpose:* The aim of this work is the instrument-aided structural survey to recover the operability of a five-storey brick building on a pile foundation after significant deformation. *Methodology:* The MicroFe software is used to simulate the stress-strain state of the building and develop the base–foundation–building system model. *Research findings:* During both construction and operation of the building, its spatial stiffness is disturbed with the crack formation in brick walls due to insufficient pile installation, i.e., the pebble-gravel layer is not reached owing to difficult engineering and geological conditions. *Practical implications:* The obtained results are used to develop recommendations to ensure the required spatial stiffness of the building by the outer wall reinforcement with strained steel bars locating at the level of intermediate floors.

Keywords: building, walls, pile foundation, differential settlement, deformation, design model; strengthening; spatial stiffness

For citation: Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zdaniya na svainom fundamente dlya obespecheniya neobkhodimoi prostranstvennoi zhestkosti [Stress-strain state modeling of brick building on pile foundation to provide spatial rigidity]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 177–187.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-177-187

При проведении геотехнического мониторинга здания, получившего значительные неравномерные осадки свайного фундамента, как правило, выполняются следующие работы: инструментальное обследование строительных конструкций и фундамента; геодезические измерения деформаций здания; дополнительные инженерно-геологические изыскания; поверочные расчеты [1]. По результатам выполненных работ предлагаются рекомендации по восстановлению эксплуатационной пригодности здания [2].

Экспериментальные исследования кирпичной кладки на действие статической сжимающей нагрузки, приложенной по диагонали фрагмента кирпичной кладки, показали, что при его нагружении, в процессе перераспределения внутренних усилий, преобладающее значение получили главные растягивающие деформации, которые оказались основной причиной разрушения испытываемых образцов [3, 4].

В работе [5] представлена методика расчета каменной кладки на основе теории сопротивления анизотропных материалов, которая позволяет выявить особенности напряженно-деформированного состояния и характера разрушения конструкций из каменной кладки.

Численные исследования, выполненные на основе разработанной дискретной модели каменной кладки, позволяют оценить степень влияния деформационного или прочностного параметров на схему упругопластического деформирования модели, а также определить резервы несущей способности каменных конструкций [6].

К вопросу усиления каменных конструкций: в статье [7] приведены результаты экспериментальных исследований фрагментов каменной кладки по влиянию композитных материалов на основе углеродных волокон на несущую способность и деформативность при действии статической нагрузки, где определен механизм работы усиленных образцов и влияние элементов усиления на изменение несущей способности каменной кладки.

С использованием ПК ANSYS Workbench в работе [8] проведен анализ напряженно-деформированного состояния кирпичной кладки, усиленной двухсторонним бетонным наращиванием с использованием объемных конечных элементов кладки.

Моделирование взаимодействия надземных конструкций и свайных фундаментов с основанием здания в настоящее время является достаточно актуальным [9]. В качестве основных критериев рассматриваются деформации (осадки) здания в целом [10, 11]. В соответствии с результатами мониторинга и выполненного моделирования напряженно-деформированного состояния здания распределение усилий и деформаций рекомендуется определять на основании расчетов в пространственной постановке в системе «основание – фундамент – здание» [12].

Рассматриваемое пятиэтажное кирпичное здание с техническим подпольем было введено в эксплуатацию в 1970 г. Здание прямоугольной формы в плане с габаритными размерами 70,89×12,85 м (рис. 1). Высота наружных стен толщиной 640 мм и внутренних стен толщиной 380 мм составляет 15,75 м. По конструктивной схеме оно выполнено с продольными несущими стенами, с поперечными капитальными стенами в трех лестничных клетках и с горизонтальными железобетонными дисками перекрытий.

При обследовании было выявлено, что фундаменты здания ленточного типа с ростверком высотой 500 мм, шириной 400 и 600 мм соответственно под внутренние и наружные стены на сборных железобетонных забивных сваях с поперечным сечением 300×300 мм, расположенных в один ряд с шагом 1,5 м. Длина свай составляет 11 м. Кроме того, в осях А–В, 1–5 существующие фундаменты были усилены дополнительными сваями с шагом 3,0 м между основными сваями (через каждые две сваи). Сваи усиления выполнены из коротких стальных труб диаметром 325 мм, соединенных между собой на сварке. Внутренняя полость свай заполнена бетоном. С существующим ростверком сваи усиления объединены через монолитный железобетонный оголовок. Усиление фундаментов стальными трубами могло быть выполнено либо на стадии строительства, либо после его окончания.

В ходе освидетельствования фундамента, по данным пройденных шурфов, были обнаружены вертикальные силовые трещины в ростверке, пространственное положение которых совпадает с вертикальными трещинами в кирпичных стенах здания. Характер и месторасположение трещин в ростверке и в стенах позволяют утверждать, что основная причина их появления – неравномерные и сверхнормативные осадки свайного фундамента. Такое техническое состояние здания принято в качестве исходного.

Геодезическими измерениями были определены отклонения продольной стены по оси А от условного горизонтального положения по длине здания и горизонтальные отклонения углов здания от вертикали [2].

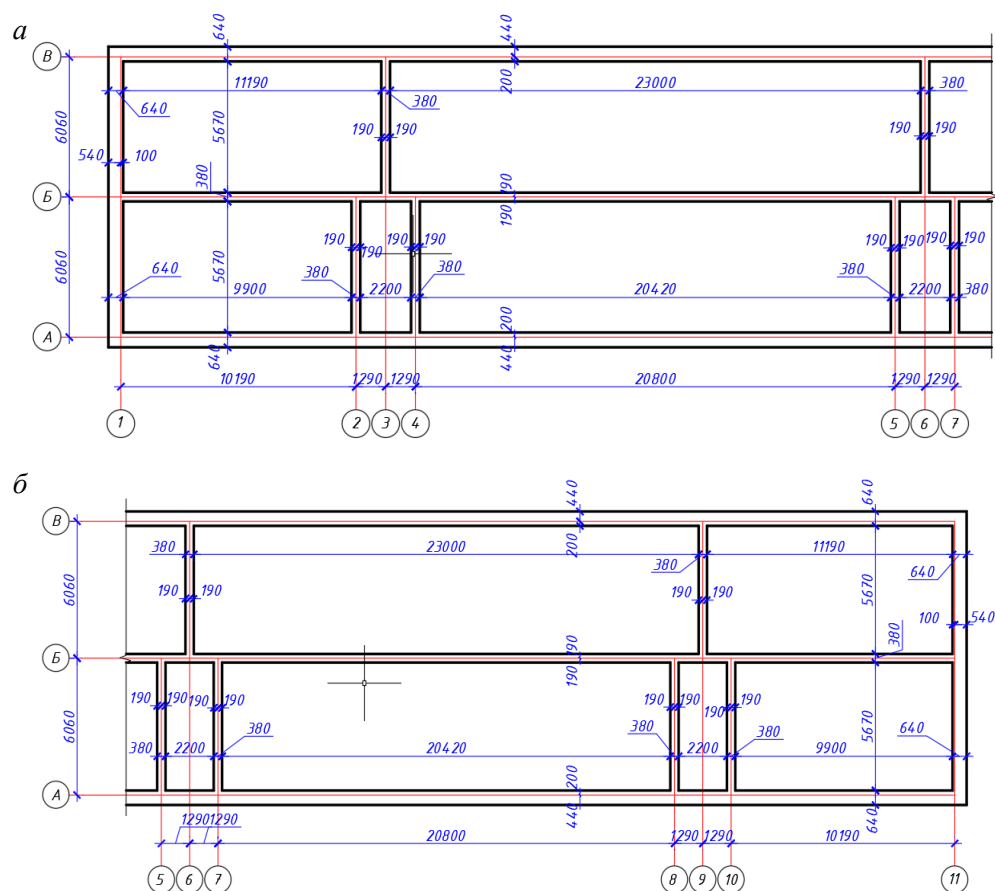


Рис. 1. Схема расположения несущих стен здания:
а – в осях 1–6; б – в осях 6–11

За период строительства и эксплуатации здания (в течение 50 лет) наружные продольные стены получили значительные и неравномерные осадки, абсолютные значения которых достигли как минимум 848 мм, что более чем в 6 раз превышает предельно допустимое значение $S_u^{\max} = 120$ мм. Измеренная относительная разность осадок наружной продольной стены по оси А на участке здания между осями 1–5 составила 0,01, что также более чем на порядок превышает предельно допустимое значение $(\Delta s/L)_u = 0,002$.

Из анализа конструктивной схемы здания и инженерно-геологических условий площадки в ПВК MicroFe была разработана расчетная модель, в которой кирпичные стены, диски перекрытий и ростверки моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», сваи моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунтовое основание под ростверком принималось в виде семислойного основания с фактическим наклонным и клиновидным расположением слоев из объемных конечных элементов с послойным заданием модуля деформации, коэффициента Пуассона, плотности, сцепления, угла внутреннего трения (без учета дилатансии),

коэффициента всестороннего сжатия (принят равным нулю). Сопряжение свай с ростверком принималось жестким. Расчеты выполнялись с учетом нелинейной работы грунта основания по модели Кулона – Мора. Материал кирпичной кладки стен задавался как ортотропный, в котором модули упругости кладки в горизонтальном и вертикальном направлениях стен составляли $E_1 = 1,2 \cdot 10^6$ кН/м² и $E_2 = 5,85 \cdot 10^6$ кН/м² соответственно. Коэффициенты Пуассона в горизонтальном и вертикальном направлениях стен приняты $\mu_1 = 0,04$ и $\mu_2 = 0,2$ соответственно. Расчетные характеристики кирпичной кладки: $R_c = 1,5$ МПа; $R_p = 0,12$ МПа; $R_{cp} = 0,49$ МПа; $R_{изг} = 0,23$ МПа. Расчетная конечно-элементная модель здания и ее визуализация приведены на рис. 2.

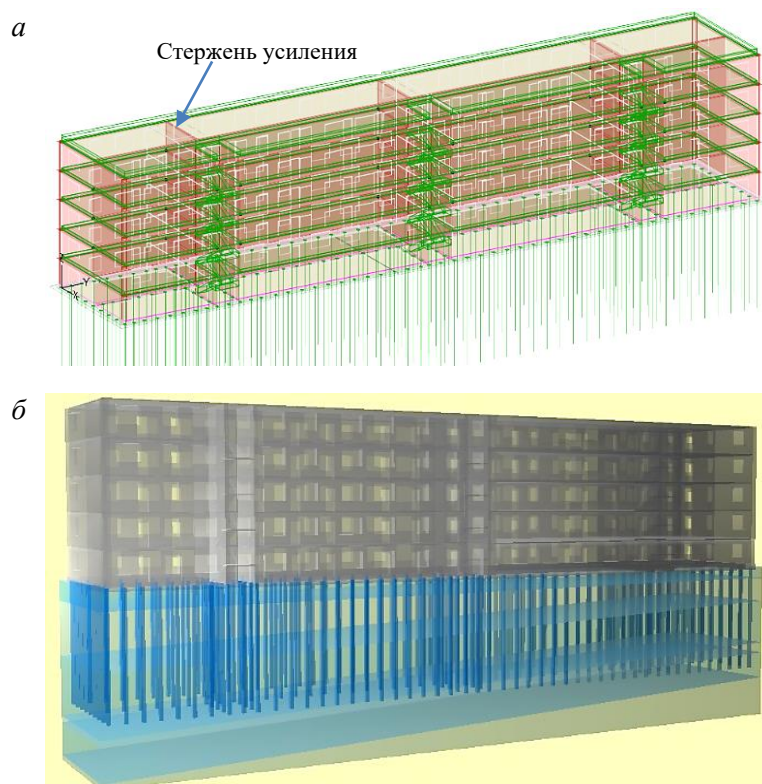


Рис. 2. Расчетная модель здания (а) и ее визуализация (б)

В расчетной модели рассматривались две расчетные схемы:

– расчетная схема № 1 – надземная часть с вертикальными трещинами в стенах и в ростверке на железобетонных сваях и на стальных сваях усиления. Расчет кирпичной кладки стен выполнялся в нелинейной постановке по теории предельных поверхностей с определением несущей способности кирпичной кладки стен по методике, приведенной, например, в работе [13]. Для кирпичных стен здания в координатах $N - M$ были построены области прочности нормальных сечений, по которым назначались группы кирпичных стен по несущей способности и выполнялся статический расчет;

– расчетная схема № 2 – надземная часть принята такой же, как и в расчетной схеме № 1. Расчет кирпичной кладки стен также выполнялся в нелинейной постановке по теории предельных поверхностей с добавлением в уровне междуэтажных дисков перекрытий контурных стальных напрягаемых стержней усиления Ø25 мм с величиной натяжения $P = 85$ кН, которое может быть обеспечено с помощью стяжных муфт.

В расчетной схеме № 1 изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен приведены на рис. 3, из которого видно, что его наибольшая величина равна $\text{Max } k = 1,9908 > 1$. Таким образом, несущая способность наружных стен не обеспечена, и необходимо их усиление с целью увеличения пространственной жесткости.

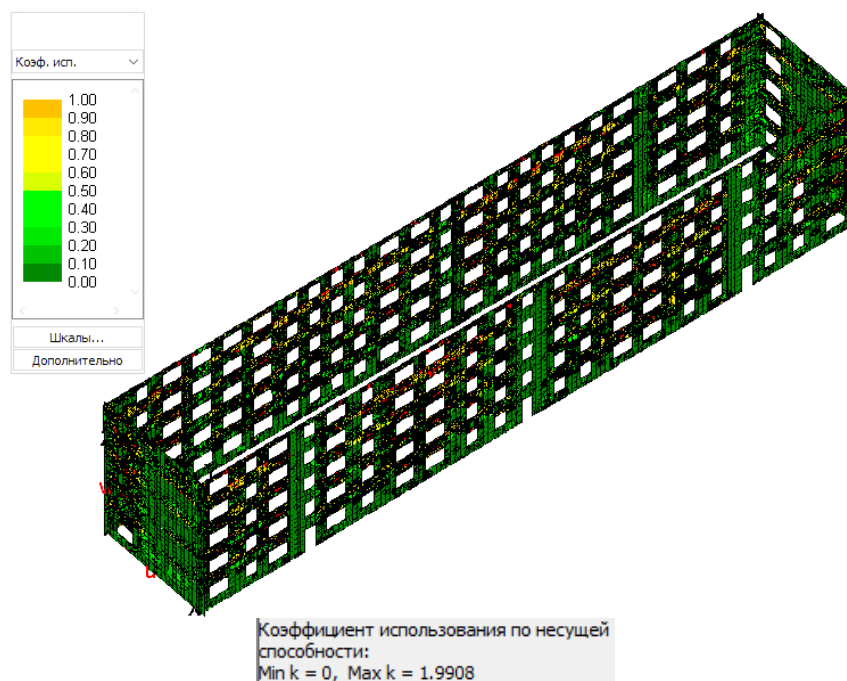


Рис. 3. Изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен в расчетной схеме № 1

В расчетной схеме № 2 изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен даны на рис. 4, из которого видно, что его величина равна $\text{Max } k = 0,993593 < 1$. Следовательно, несущая способность наружных стен при усилении контурными (в уровне междуэтажных перекрытий) напрягаемыми стальными стержнями Ø 25 мм будет обеспечена.

Представляет интерес распределение главных напряжений в срединной плоскости наружных стен (рис. 5). Наибольшие главные растягивающие напряжения в кладке составляют $\sigma_{\text{гл. р}} = 0,56$ МПа $> R_p = 0,12$ МПа (возможно появление микротрещин в локальных областях кладки), максимальные главные сжимающие напряжения в кладке равны $\sigma_{\text{гл. с}} = 0,40$ МПа $< R_c = 1,5$ МПа.

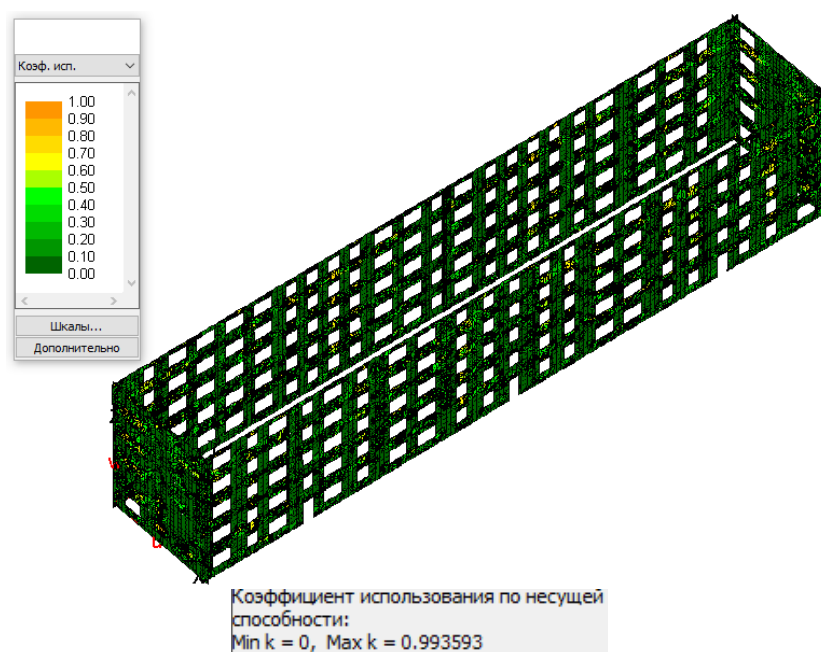


Рис. 4. Изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен в расчетной схеме № 2 после усиления

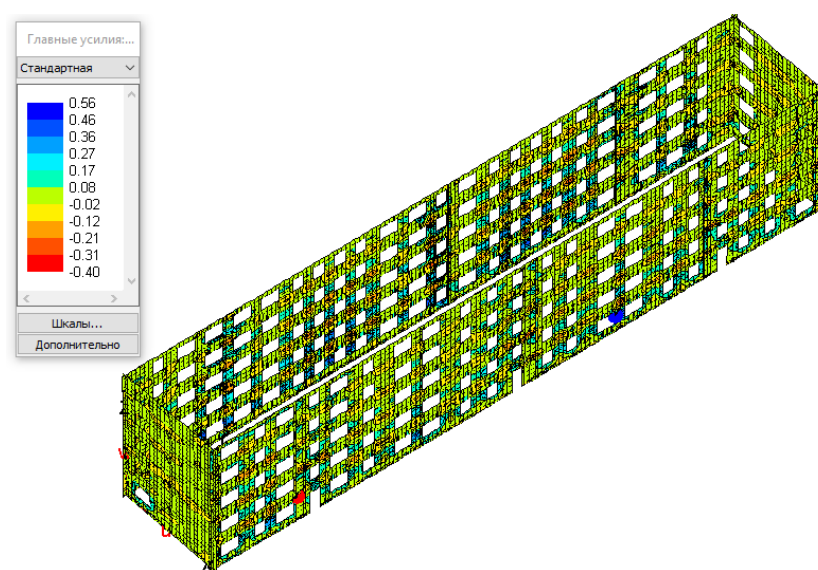


Рис. 5. Изополя главных напряжений (МПа) в срединной плоскости наружных стен в расчетной схеме № 2 после усиления

Изополя вертикальных и горизонтальных перемещений наружных стен после усиления представлены на рис. 6 и 7. Расчетная относительная разность

вертикальных перемещений наружной продольной стены по оси A на участке здания между осями 1–5 составила 0,001, что в два раза меньше предельно допустимого значения $(\Delta s/L)_u = 0,002$.

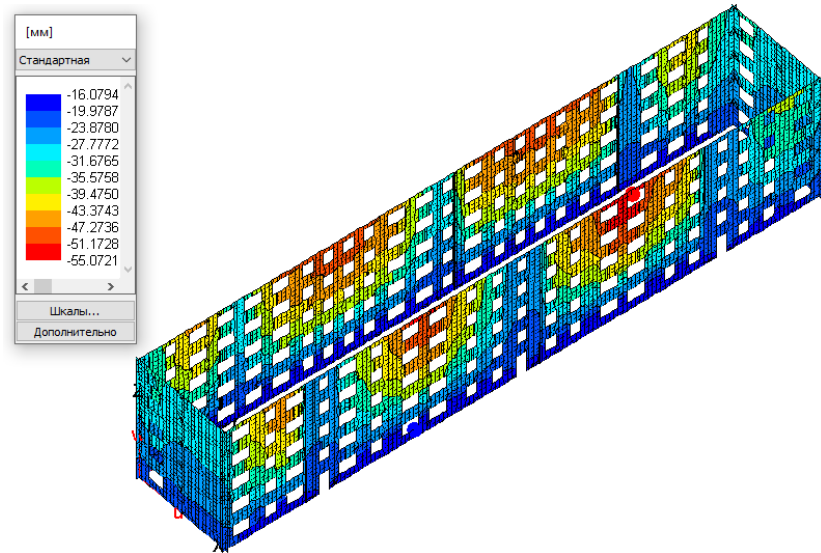


Рис. 6. Изополя вертикальных перемещений наружных стен в расчетной схеме № 2 после усиления

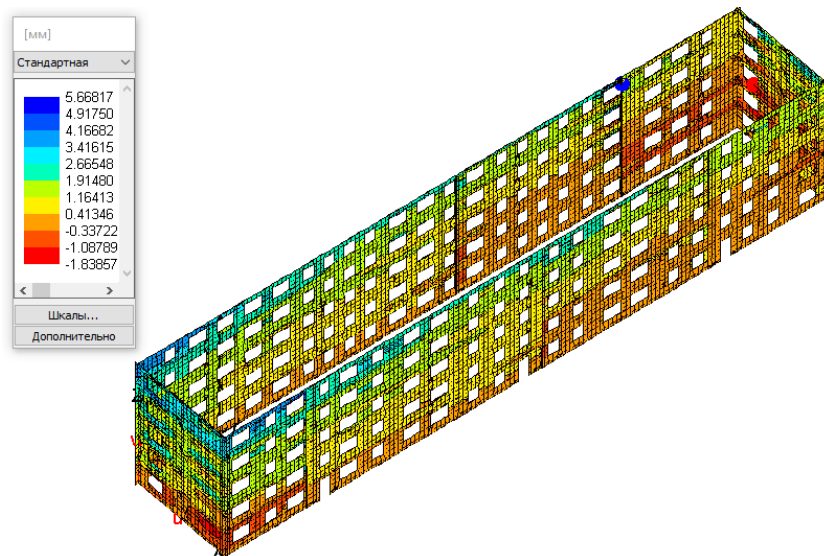


Рис. 7. Изополя горизонтальных перемещений наружных стен по оси X (в поперечном направлении здания) в расчетной схеме № 2 после усиления

Отклонения наружных стен из плоскости от вертикали достигают 5,3 мм. Горизонтальные предельные перемещения стен ограничиваются вели-

чиной $f_u = h/500 = 15750/500 = 31,5$ мм, где h – высота наружных стен. Следовательно, расчетные отклонения стен из плоскости не превышают горизонтальные предельно допустимые пересечения стен для рассматриваемого типа многоэтажных зданий.

В заключение можно отметить, что измеренные при проведении мониторинга вертикальные перемещения стены по оси А с максимальным значением, равным 848 мм, не являются результатом осадки свайного фундамента в классическом понимании, а выступают лишь следствием фактического залегания опорного гравийно-галечникового слоя.

Перед усилением свайного фундамента следует обеспечить необходимую пространственную жесткость здания путем устройства контурных напрягаемых стальных стержней Ø 25 мм в уровне междуэтажных перекрытий с внешней стороны наружных стен здания.

После создания необходимой пространственной жесткости адекватное техническое состояние здания, обеспечивающее его эксплуатационную пригодность, будет достигнуто после усиления существующего фундамента металлическими сваями с опиранием на гравийно-галечниковый грунт.

Если в результате длительной эксплуатации здания нижние концы всех свай достигли гравийно-галечникового слоя и не наблюдается дальнейшее накопление осадок, усиление свайного фундамента можно не производить.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономарев А.Б., Захаров А.В., Сазонова С.А., Калюшина С.В., Безгодов М.А., Шенкман Р.И., Золотозубов Д.Г. Геотехнический мониторинг жилого дома // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 41–45.
2. Юцубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А., Лобанов А.А., Лазарев В.М. Оценка надежности кирпичного здания на свайном фундаменте в условиях развития неравномерных осадок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 1. С. 202–215.
3. Копаница Д.Г., Усеинов Э.С., Устинов А.М. Деформации и разрушение фрагмента каменной кладки при кратковременном действии сжимающей статической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 90–97.
4. Деркач В.Н., Белов В.В. Прочность каменной кладки на растяжение под углом к горизонтальным растворным швам // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2. С. 65–70.
5. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Результаты исследований каменных и армокаменных кладок // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 99–106.
6. Кабанцев О.В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 113–133.
7. Тонких Г.П., Осипов П.В., Темиргалиулы Г., Федоров С.К. Экспериментальные исследования каменной кладки, усиленной композитными материалами на основе углеродного волокна // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2. С. 98–111.
8. Новожилова Н.С. Исследование напряженного состояния кирпичных стен, усиленных бетонным наращиванием при местном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 34–41.
9. Шашкин В.А. Эффекты взаимодействия оснований и сооружений // Развитие городов и геотехническое строительство. 2012. № 14. С. 141–167.

10. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Взаимодействие здания и основания: методика расчета и практическое применение при проектировании / под ред. В.М. Улицкого. Санкт-Петербург : Стройиздат, 2002. 48 с.
11. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5. С. 15–26.
12. Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Филиппович А.А., Тряпичин А.Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания повышенной этажности на свайном фундаменте // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 72–77.
13. Семенов Д.А. Прочность железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5. С. 76–84.

REFERENCES

1. Ponomarev A.B., Zakharov A.V., Sazonova S.A., Kalyushina S.V., Bezgodov M.A., Shenkman R.I., Zolotozubov D.G. Geotekhnicheskii monitoring zhilogo doma [Geotechnical monitoring of a residential building]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2015. No. 9. Pp. 41–45. (rus)
2. Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A., Lobanov A.A., Lazarev V.M. Otsenka nadezhnosti kirpichnogo zdaniya na svainom fundamente v usloviyakh razvitiya neravnomernykh osadok [Reliability of brick building on pile foundation in relative settlement conditions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022. V. 24. No. 1. Pp. 202–215. (rus)
3. Kopanitsa D.G., Useinov E.S., Ustinov A.M. Deformatsii i razrushenie fragmenta kamennoi kladki pri kratkovremennom deistvii szhimayushchei staticheskoi nagruzki [Deformation and fracture of masonry under compressive load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 90–97. (rus)
4. Derkach V.N., Belov V.V. Prochnost' kamennoi kladki na rastyazhenie pod uglom k gorizontaln'ym rastvornym shvam [Tensile strength of masonry at an angle to horizontal mortar joints]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012. No. 2. Pp. 65–70. (rus)
5. Sokolov B.S., Antakov A.B. Rezul'taty issledovaniy kamennykh i armokamennykh kladok [Masonry and reinforced masonry]. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 3. Pp. 99–106. (rus)
6. Kabantsev O.V. Diskretnaya model' kamennoi kladki v usloviyakh dvukhnosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Plastic deformation of masonry under biaxial stress affected by adhesive strength between brick and mortar]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 4. Pp. 113–133. (rus)
7. Tonkikh G.P., Osipov P.V., Temiraliuly G., Fedorov S.K. Eksperimental'nye issledovaniya kamennoi kladki, usilennoi kompozitnymi materialami na osnove uglerodnogo volokna [Experimental research of carbon fiber-reinforced masonry]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 2. Pp. 98–111. (rus)
8. Novozhilova N.S. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya kirpichnykh sten, usilennykh betonnykh narashchivaniem pri mestnom szhatii [Stress state of masonry walls with concrete reinforcement under local compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021. No. 6 (89). Pp. 34–41. (rus)
9. Shashkin V.A. Effekty vzaimodeistviya osnovanii i sooruzhenii [Interaction between foundations and structures]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2012. No. 14. Pp. 141–167. (rus)
10. Shashkin A.G., Shashkin K.G. Vzaimodeistvie zdaniya i osnovaniya: metodika rascheta i prakticheskoe primeneniye pri proektirovani [Interaction of building and foundation: Design methodology and practical application], V.M. Ulitskii, Ed. Saint-Petersburg: Stroiizdat, 2002. 48 p. (rus)
11. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Uchet izmenenii raschetnoi skhemy pri analize raboty konstruktsii [Changes in the design model during structure operation analysis]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014. No. 5. Pp. 15–26. (rus)
12. Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Filippovich A.A., Tryapitsin A.E. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zdaniya povyshennoi etazhnosti na svainom fundamente [Stress-strain state modeling of high-rise brick building on pile foundation]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 4 (69). Pp. 72–77. (rus)

13. *Semenov D.A.* Prochnost' zhelezobetonnykh elementov pri kosom vnetsentrennom szhatii [Strength of reinforced concrete elements under oblique eccentric compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015. No. 5. Pp. 76–84. (rus)

Сведения об авторах

Ющубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Тарасов Александр Александрович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

Authors Details

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; sv@tsuab.ru

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; ivanpodchivalov@list.ru

Aleksandr A. Tarasov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; tar.a.a@mail.ru

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

УДК 624.21.072

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-188-198

*В.М. КАРТОПОЛЬЦЕВ, А.В. КАРТОПОЛЬЦЕВ,
ООО «ДИАМОС»*

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩИХ БАЛОК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Аннотация. Изменение динамических характеристик вызвано внедрением новых типов конструктивных решений в проектирование мостов, а именно: заменой железобетонной плиты проезжей части на ортотропную, отступлением от типовых решений в формировании продольных схем и применением нового типа опорных частей, обеспечивающих диссипацию энергии колебаний и обладающих эффектом гиromаятника.

Особенностью этапа регулирования динамических характеристик с учетом многофакторных дефектов является пренебрежение величиной демпфирования амортизаторов движущихся автомобилей по поверхности проезжей части. В этом случае целесообразно регулировать динамические характеристики с учетом диссипации энергии колебательных процессов в рамках внутренней и внешней границ деформирования, каждая из которых функционально разрешима зависимостями между параметрами статического и динамического условия упругости и пластичности.

Многолетний опыт диагностики мостов в условиях изменяющегося воздействия временной подвижной нагрузки позволяет выявить критические моменты и предельные значения динамических характеристик, при которых происходит нарушение целостности работы конструкции системы «пролетное строение + автомобиль».

Разобщенность работы элементов системы, по мнению авторов, осложняется воздействием широкого спектра динамических воздействий, имеющих природу, обратную механическому воздействию от гасителей колебаний в виде всесторонних подвижных опорных частей. Критерием регулирования динамических характеристик в таких условиях следует считать проявление противофазности колебаний массы пролетного строения и опорных частей и соотношение их жесткостных показателей.

На основе полученных авторами результатов теоретических и экспериментальных исследований динамической работы пролетных строений мостов представлены базовые положения регулирования динамических характеристик:

– методика определения критической скорости временной подвижной нагрузки должна включать различные формы энергии деформированного состояния конструкции, в том числе резонансные;

- регулирование динамических характеристик эффективно только в условиях диссипации и рассеяния энергии колебательного процесса системы «пролетное строение + автомобиль»;
- новые параметры и требования к мостовым сооружениям с отрегулированными динамическими характеристиками должны быть адекватны параметрам широкого диапазона численного моделирования экспериментальных исследований мостов с пролетами от 40 до 60 м, 80 м и более;
- в рамках регулирования характеристик при статической и динамической нагрузках мостовых конструкций на основе результатов уникальных натурных экспериментов на мостах с альтернативным уклоном проектирования реализуется ряд оптимизационных задач модернизации вибродиагностики мостов.

Ключевые слова: мост, пролетное строение, регулирование динамических характеристик, колебания, резонанс, система, диагностика, дефекты, жесткость, проезжая часть, диссипация, демпфирование

Для цитирования: Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Регулирование динамических характеристик несущих балок пролетных строений автодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 188–198.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-188-198

V.M. KARTOPOLTSEV, A.V. KARTOPOLTSEV,
ООО “DIAMOS”

DYNAMIC PROPERTY CONTROL OF BRIDGE GIRDERS

Abstract. The dynamic properties of bridge girders depend on the design solutions, namely the replacement of the roadway slab by the orthotropic, deviation from standard solutions in the formation of longitudinal schemes, and the use of a new type of supports causing the dissipation of vibration energy and gyropendulum effect.

The control for dynamic properties with regard to multifactorial defects, is characterized by ignoring the shock dampers of vehicles moving on the roadway. In this case, it is advisable to control the dynamic properties with regard to the energy dissipation of oscillatory processes within the internal and external strain boundaries, each of which can be functionally solved by the dependencies between the parameters of static and dynamic conditions of elasticity and plasticity.

Long experience in diagnosing bridges under varying conditions of moving load allows identifying critical moments and limiting values of dynamic properties, at which the integrity of the span-vehicle system is violated.

The difference in the operation of the system elements is complicated by the influence of a wide range of dynamic impacts, whose nature is opposite to the mechanical impact of vibration dampers such as all-round moving supports. In this case, the criterion for the dynamic property control are anti-phase vibrations of the girder and supports and their stiffness ratio.

Based on the results, the dynamic property control includes the identification of the critical speed of the moving load based on various forms of energy of the deformed state of the structure, including resonance; conditions of the energy dissipation of the vibration process of the span-vehicle system; new parameters and requirements for bridge structures with controlled dynamic properties adequate to those of numerical simulation of bridge girders of 40 to 60 or 80 m and longer; optimization and modernization of bridge vibration-based diagnostics.

Keywords: bridge girder, dynamic property control, vibrations, resonance, system, diagnostics, defects, stiffness, roadway, dissipation, damping

For citation: Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V. Regulirovanie dinamicheskikh kharakteristik nesushchikh balok proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov

[Dynamic property control of bridge girders]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 188–198.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-188-198

Глубокий анализ натурных испытаний ряда мостов средних и больших пролетов в реальных эксплуатационных условиях является основой регулирования динамических характеристик при колебаниях в упругой и упругопластической стадиях. Как следствие, в стадии упругопластического деформирования несущих элементов пролетных строений мостов чувствительность к скоростям динамических деформаций рассматривается с учетом эффекта задержки деформаций и дефектов проезжей части [1–4].

По формулам теории вероятности и математической статистики авторами проведена попытка учесть влияние дефектов пролетных строений на формирование и прохождение процесса колебания [5, 6]. В основном исследование проводилось применительно к балочным мостам, а также однопролетным мостам небалочного типа. Результаты виброиспытаний показали неизвестные ранее уровни требований к проблеме, т. к. динамическое воздействие зависит от уровня транспортных средств, его подрессоривания и скорости движения.

Продвижение теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия движущейся подрессоренной нагрузки и балок пролетного строения связано с введением эквивалентной системы, где в качестве временной нагрузки использовалась «двухмассовая механическая система с линейно-упругими связями». Любое демпфирование в процессе колебаний отрицалось, что методологически неверно. Выводы, что наибольший динамический эффект в этом случае наибольший в момент схода нагрузки с балки, являются неправомерными.

Из-за стремления найти современное представление о воздействиях изменяющихся во времени подвижных нагрузок на мостовые конструкции и создать реальную научно обоснованную модель их воздействия учеными мирового сообщества принимались решения по определению динамических характеристик в стохастическом виде. Работы И.И. Гольденבלата акцентировали на исследования при решении практических задач эффективности воздействия подвижной нагрузки от встречного и параллельного движения.

В отечественной практике виброиспытаний мостовых сооружений известны системы диагностики Минстроя типа ВЧ-6-ТН, ООО 33 Pooolrou и СМ-3-КВ, способные к измерению ускорений и скоростей элементов в системе. Общим недостатком вибродиагностики мостов в нашей стране и за рубежом следует считать фиксацию одной или максимум двух форм собственных и вынужденных колебаний [7].

В случае применения комплексного показателя жесткости при гармоническом нагружении в качестве показателя энергоемкости колебательного процесса системы примем μ , равный

$$\mu = \frac{p^2}{p^2 - w^2} - 1, \quad (1)$$

где p , w – частоты собственных вынужденных колебаний.

При регулировании динамических характеристик в рамках энергетического спектра колебаний без и с учетом инерционности массы системы «пролетное строение + автомобиль» установлены целесообразные узкополосные полосы колебаний, равные 2,12–5,6 Гц, в пределах которых возможно проводить операционные вычисления в стадии регулирования характеристик [8] (рис. 1, 2). Наиболее мощные энергетические спектры узкополосных частот, не поддающиеся регулированию, находятся в пределах 1,22–2,5 Гц [9].

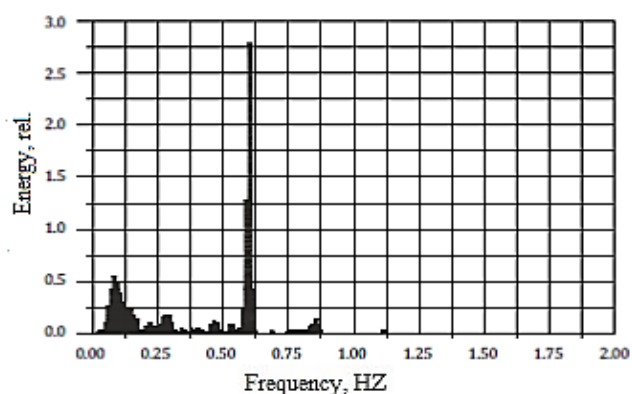


Рис. 1. Энергетический спектр колебаний балки без учета инерционной массы системы

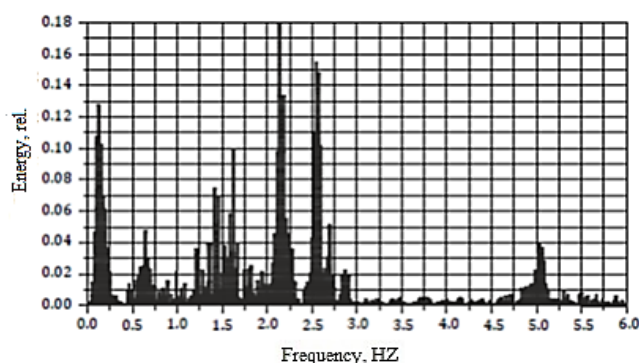


Рис. 2. Энергетический спектр колебаний балки с учетом инерционной массы системы

Запишем потенциальную энергию внутренних сил в энергетическом виде:

$$U_0 = \int_0^{\ell} \frac{M_{\Pi}^2 + M_{\text{вп}}}{2EJ} dx + \int_0^{\ell} \frac{Q_{\Pi}^2 + Q_{\text{вп}}}{2C \cdot \gamma \cdot B} dx. \quad (2)$$

Дополнительная энергия за счет инерционности системы от динамического воздействия равна

$$\Delta U_0 = \int_0^{\ell} \frac{\sigma_i^2}{2E_0} + \int_0^{\sigma_i} (\varepsilon_{\text{уп}} + \varepsilon_p) d\sigma_i, \quad (3)$$

где E_0 – объемный модуль упругости материала балки пролетного строения; γ – коэффициент увеличения амплитудно-частотных характеристик; B – характеристика жесткости балки; C – коэффициент пропорциональности.

Тогда, суммируя $U = U_0 + \Delta U_0$, решаем задачу по определению предельных динамических напряжений и деформаций: напряжение σ_i определяется из аппроксимации диаграммы « $\sigma - \epsilon$ » в виде

$$\sigma_i = A \cdot \epsilon_p^m, \quad (4)$$

где $m = 0,25-0,3$ – для углеродистых сталей, $m = 0,03-0,05$ – для низколегированных сталей повышенной и высокой прочности; A – константа для сталей, имеющая размерность напряжения. При $\epsilon_p = 0,0016$ – упругая стадия; $\epsilon_p = 0,0025$ – упругопластическое деформирование.

Известно, что работа стали мостовых конструкций за пределом упругости характеризуется проявлением деформационной анизотропии в процессе быстрого поворота вектора приращений пластических деформаций по сравнению с поворачивающимся вектором основных напряжений при деформировании. Отклонения между векторами характеризуют эффект запаздывания, равный 4–7 %, установленный на основе обобщенной модели Тейлора – Кармана – Рахматуллина и критерия Котрелла – Кэмпбелла [10, 11] (рис. 3).

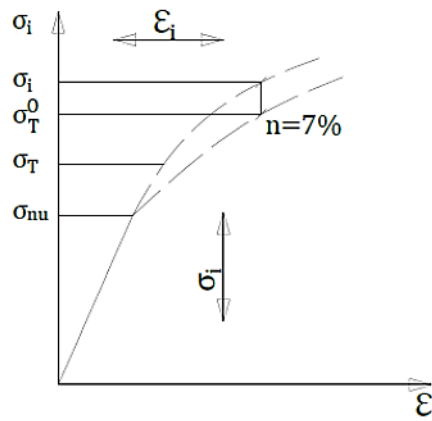


Рис. 3. Графическое отображение эффекта запаздывания

Запаздывание упругопластических деформаций происходит на участке $\frac{3}{2}\epsilon_y$ при суммарной деформации, равной

$$\epsilon_i = \epsilon_y + \Delta\epsilon_p = \frac{3}{2}\epsilon_y. \quad (5)$$

Тогда напряженное состояние стального элемента пролетных строений мостов от статических и динамических нагрузок на участке $\frac{3}{2}\epsilon_y$ характеризуется напряжением за пределом упругости, равным

$$\sigma_i = 1,15R_y, \quad (6)$$

где R_y – предел упругой пропорциональности, равный для моностальных конструкций $R_y = R_n$, для бистальных $R_y = R_c$ – расчетное сопротивление менее прочной стали в сечении.

С учетом эффекта задержки деформаций начало упругопластического деформирования определяется величиной R_y^0 :

$$R_y^0 = \frac{R_y}{\sqrt{1 - \mu + \mu^2}}, \quad (7)$$

где $\mu = 0,47$ – коэффициент Пуассона.

Процесс протекания колебаний в упругой и упругопластической стадиях от воздействия временной подвижной нагрузки, а также граничных условий напряженно-деформированного состояния был запрототипирован с помощью пьезокерамических вибродатчиков, уникальность которых впервые была проверена на испытании ряда мостов в Республике Саха (Якутия). Сравнение динамических характеристик, полученных с помощью пьезокерамических и торцевых вибродатчиков, указывает на их уникальность и практическую применимость в продвижении пока нерешенных в настоящее время вопросов численного моделирования динамических процессов [12].

Представляя временную подвижную нагрузку в виде равномерно распределенной по длине пролета, движущейся с $V = \text{const}$, регулируемые динамические характеристики в состоянии резонанса можно определить выражением

$$\left. \begin{aligned} V^2 &\gg \frac{EJ_{stb}}{m} \frac{i^2 \cdot \pi^2}{\ell^2}; \quad i = 1; \\ w_p &= \frac{i}{2\pi} \sqrt{\frac{EJ_{stb} \cdot i^2 \cdot \pi^2}{\ell^2} - m \cdot V^2}; \\ A_p &= e^{0,693}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В процессе экспериментальных исследований временная продолжительность успокоения пролетного строения за счет диссипативных эффектов приводит не к резонансным явлениям, а лишь к эффекту биения на отметке максимума частот собственных колебаний [13, 14]. Объяснение данного обстоятельства связано с процессом затухания давления от автомобиля за счет срабатывания рессорной части и приспособляемости конструкции, а биение рассматривается как проявление альтернативного «затухающего» резонанса динамической системы, при котором частотные и амплитудные характеристики и затухание колебаний изменяются независимо от формы колебаний, а по законам изменения масс с учетом их нагруженности. Подтверждением являются результаты испытаний моста через р. Яю в Томской области со схемой 42,6 + 42,6 + 42,6 м единичным автомобилем $P_{вр} = 25$ тс с гармонической нагрузкой 2,5 тс.

Авторы пришли к выводу, что при регулировании динамических характеристик и в целом динамического процесса, включая резонанс, следует ориентироваться на зависимость между скоростью распространения волн изгиба в несущих элементах пролетного строения и скоростью движения транспорта в случайном потоке на основании предположения, что скорость волны колебания не зависит от частоты колебаний, а является лишь функцией ее направления [15, 16].

По мере роста скорости движения транспорта в случайном потоке растет и скорость волнового фронта колебаний основного направления, а также с одновременным увеличением амплитуды колебания, что характерно для предрезонансной зоны динамического процесса. Наличием внутреннего трения в материале при упругой и упругопластической работе существенно повышается влияние внутреннего сопротивления системы «пролетное строение + автомобиль» за счет сопротивления рессор автотранспорта, определяющим параметром которых является коэффициент Ψ , равный [17, 18]:

$$\Psi = \frac{4\pi \cdot \varepsilon_i \cdot w^2}{p^2}, \quad (9)$$

где ε_i – уровень деформаций в балках ($\varepsilon_i = \varepsilon_y$ – упругое состояние; $\varepsilon_i = \varepsilon_y + \Delta\varepsilon$ – упругопластическое состояние); w – частота вынужденных колебаний с учетом

внутренней диссипации; $p = \frac{L}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot i^2 \cdot \pi \cdot m V^2}{m_0 + m}}$ – частота собственных колеба-

ний; m_0 – масса 1 пог. м балки; m – масса движущейся нагрузки; V – разрешенная скорость движения транспорта; $i = 1$; E – жесткость балки; L – длина балки.

На протяжении почти 50 лет учеными мирового сообщества усовершенствовались приемы расчета, проектирования и динамической диагностики мостов, имеющих в основном железобетонную плиту в качестве проезжей части. В конце XX и начале XXI в. новые конструкции мостов имеют ортотропную плиту проезжей части, оригинальные по своему назначению и конструкциям опорные части, а также на альтернативной основе расчетные схемы мостовых сооружений, в которых в большинстве случаев имеются отступления от консервативных условий и правил проектирования. Особую позицию и новизну исследования представляют бистальные пролетные строения, которые являются не только уникальными по эффективности применения материала, но и открывающими новое направление в материаловедении, конструировании, статических и динамических методах расчета с учетом эффекта задержки пластических деформаций, рассматриваемые как диссипативные силы внутреннего трения в колебательном процессе [19, 20].

Применение ортотропных плит вместо железобетонных $EJ_c \ll EJ_{stb}$ позволяет снижение металлоемкости несущих балок пролетных строений за счет применения высокопрочной стали или бистальных сечений на 7–10 %, тем самым снижается жесткость, а значит, нарушается установленный традиционный подход к расчету динамических характеристик. Попытка уравнивать недостатки и преимущества уже существующих методов расчета динамических характеристик путем увеличения жесткости подвесок, а также применение

альтернативных длин пролетов расчетных схем меньшей длины, а значит, более жестких, с одной стороны, и увеличение массы системы «пролетное строение + автомобиль», с другой стороны, приводят к снижению частоты собственных колебаний.

Анализ достаточно обширного количества источников научной информации исследований отечественных и зарубежных ученых с различными школами направлений показывает заметный вклад проф. Н.Н. Стрелецкого, Ю.В. Гайдарова, В.М. Картопольцева, М.Н. Лашенко, К.Х. Толмачева в решение проблемы регулирования напряжения в металлических и железобетонных пролетных строениях автодорожных мостов. Упругое и упругопластическое состояние несущих элементов пролетного строения моста характеризуется энергетической составляющей вязкого внутреннего трения h . В этом случае механическая характеристика $(1 + \mu g)$, которая характеризует не что иное, как усиление колебаний в связи с инерционностью системы, и становится энергетическим параметром. В этом случае внешняя временная нагрузка $P_{вр}$ оказывается неуравновешенной, и колебания системы переходят в форму резонанса. Вязкое трение в металлических несущих балках пролетных строений мостов сопоставимо с конструкционным гистерезисом, характеризующим несовершенства упругих и упругопластических свойств металла.

Впервые в рамках упругопластического деформирования балок металлических пролетных строений сделана попытка расширить формы и границы регулирования динамических характеристик. Спектр колебаний с остаточными деформациями пролетных строений необходимо определять с учетом диссипации или рассеяния энергии, а также в условиях возможной противофазной формы колебаний.

Рассматривая энергоемкость колебательного процесса в качестве многофункционального критерия регулирования динамических характеристик, удалось выявить особенности влияния инерционности массы системы на узкополосность частотных характеристик, особенно при работе конструкции за пределом упругости. Динамическое состояние пролетных строений мостов, когда скорость распространения упругих и квазиупругих волн колебаний соизмерима со скоростью движения временной подвижной нагрузки, будет устойчивым при условии, если временная нагрузка в определенный момент будет выполнять функцию дебаланса. В этом случае временная подвижная нагрузка в отличие от системы «пролетное строение + автомобиль» становится неуравновешенной, колебания конструкции моста с последующим переходом вызывают стадию резонанса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Картопольцев А.В. Совершенствование метода оценки динамических характеристик пролетных строений балочных автодорожных мостов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Картопольцев Андрей Владимирович. Томск, 1998. 147 с.
2. Paltre P., Prouls J. Dynamic testing of Laroje-Scale Structures // Structural Engineering International. 1997. V.7. № 1. P. 29–34.

3. *Bochkarev N.N., Kartopolsev A.V., Safronov V., Shendel A.S.* Numerical modeling of experimental researches steelconcrete of flying structures of road bridges // 9th International Scientific conference VSU. Sofia, Bulgaria. P. II–229, II–231.
4. *Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д.* Влияние дефектов проезжей части на изменение динамических характеристик пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 156–164.
5. *Картопольцев А.В., Картопольцев В.М., Кухаренко С.А.* К вопросу о динамическом коэффициенте // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 5. С. 127–141.
6. *Будковой А.Н.* Нестационарные колебания балочных систем при переходных режимах воздействия подвижной нагрузки : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Воронеж, 2014. 20 с.
7. *Чжао Цзянь, Белуцкий И.Ю., Яцура В.Г.* Отражение воздействия временной нагрузки в динамическом коэффициенте при расчете автодорожных мостов // Ученые заметки ТОГУ. 2013. Т. № 4. С. 1657–1661.
8. *Kartopolsev A.V., Bochkarev N.N., Selivanova T.V.* The analysis of the compelled fluctuations of flying structures road bridges in conditions of real operation // Proceedings International Conference VSU'2005. Bulgaria, Sofia. 2005. V. 1. P. II 226–228.
9. *Катцын П.А., Акимов Б.Г., Чиков С.А., Полуботко А.Ю., Костарев Д.А.* Исследование напряженно-деформированного состояния моста через реку Томь в городе Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2001. № 2. С. 116–120.
10. *Картопольцев В.М.* Металлические мосты с бистальными балками / под ред. К.Х. Толмачева. Томск : Изд-во Томского университета. 1992. 241 с.
11. *Картопольцев А.В., Картопольцев В.М., Кухаренко С.А.* К вопросу развития методов регулирования динамических характеристик пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 201–219.
12. *Картопольцев В.М., Сафронов В.М., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д.* Определение динамических напряжений и деформаций в сталежелезобетонных мостах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3. С. 194–204.
13. *Картопольцев А.В., Картопольцев В.М., Зголич М.В.* К вопросу о диссипативности деформирования балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2. С. 194–199.
14. *Ibrahim R.A., Pilipchuk V.N., Ikeda T.* Recent advances in liquid sloshing dynamics // Appl. Mech. Rev. 2001. V. 54. № 2. P. 133–199.
15. *Работнов Ю.Н., Суворова Ю.Б.* Распространение упругопластических волн в стержнях и балках с учетом запаздывания текучести // ПТМТФ. 1968. № 6. С. 193–198.
16. *Скучик Е.* Простые и сложные колебательные системы. Москва : Мир. 1971. 552 с.
17. *Кольский Г.* Волны напряжений в твердых телах. Москва : Изд-во иностранной литературы. 1955. 192 с.
18. *Ротенберг Р.В.* Подвеска автомобиля. Москва : Машиностроение. 1972. 395 с.
19. *Работнов Ю.Н., Суворова Ю.В.* Динамика жесткопластической балки с запаздыванием текучести // МТТ. 1968. № 6. С. 78–86.
20. *Картопольцев В.М.* Применение бистальных балок в пролетных строениях автодорожных мостов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Картопольцев Владимир Михайлович. Ленинград, 1991. 33 с.

REFERENCES

1. *Kartopolsev A.V.* Sovershenstvovanie metoda otsenki dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii balochnykh avtodorozhnykh mostov: Dissertatsiy na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Assessment improvement of dynamic properties of bridge girders. PhD Thesis]. Tomsk, 1998. 147 p. (rus)
2. *Paltre P., Prouls J.* Dynamic testing of Laroje–Scale Structures. *Structural Engineering International*. 1997. V. 7. No. 1. Pp. 29–34.

3. *Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V., Safronov V., Shendel A.S.* Numerical modeling of experimental researches steel concrete of flying structures of road bridges. In: *Proc. 9th Int. Sci. Conf. VSU, Sofia, Bulgaria*. Pp. II–229, II–231.
4. *Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D.* Vliyanie defektov proezzhei chasti na izmenenie dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov [Effect of trafficway defects on dynamic properties of bridge spans]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 156–164. (rus)
5. *Kartopoltsev A.V., Kartopoltsev V.M., Kukhareno S.A.* K voprosu o dinamicheskom koeffitsiente [Towards the dynamic coefficient]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 5. Pp. 127–141. (rus)
6. *Budkovoi A.N.* Nestatsionarnye kolebaniya balochnykh sistem pri perekhodnykh rezhimakh vozdeistviya podvizhnoi nagruzki: avtoreferat dissertatsii na soiskanie stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Unsteady oscillations of beam systems under transient modes of moving load. PhD Abstract]. Voronezh, 2014. 20 p. (rus)
7. *Chzhao Tszyan', Belutskii I.Yu., Yatsura V.G.* Otrazhenie vozdeistviya vremennoi nagruzki v dinamicheskom koeffitsiente pri raschete avtodorozhnykh mostov [Moving load in the dynamic coefficient in bridge analysis]. *Uchenye zametki TOGU*. 2013. V. 4. No. 4. Pp. 1657–1661. (rus)
8. *Kartopoltsev A.V., Bochkarev N.N., Selivanova T.V.* The analysis of the compelled fluctuations of bridge structures in real operation conditions. In: *Proc. Int. Conf. VSU'2005*. Bulgaria. Sofia, 2005. V. 1. Pp. II 226–228.
9. *Kattsyn P.A., Akimov B.G., Chikov S.A., Polubotko A.Yu., Kostarev D.A.* Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya mosta cherez reku Tom' v gorode Tomske [Stress-strain state of bridge over the Tom River in Tomsk]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2001. No. 2. Pp. 116–120. (rus)
10. *Kartopoltsev V.M.* Metallicheskie mosty s bistol'nymi balkami [Metal bridges with bistol beams]. K.Kh. Tolmachev, Ed. Tomsk, 1992. 241 p. (rus)
11. *Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kukhareno S.A.* K voprosu razvitiya metodov regulirovaniya dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov [Towards dynamic property control of bridge spans]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 23. No. 6. Pp. 201–219. (rus)
12. *Kartopoltsev V.M., Safronov V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D.* Opreделение dinamicheskikh napryazhenii i deformatsii v stalezhelezobetonnykh mostakh [Stress-strain state of composite bridges]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 3. Pp.194–204. (rus)
13. *Kartopoltsev A.V., Kartopoltsev V.M., Zgolich M.V.* K voprosu o dissipativnosti deformirovaniya balok proletnykh stroenii mostov [Dissipative deformation of bridge span beams]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 2. Pp.194–199. (rus)
14. *Ibrahim R.A., Pilipchuk V.N., Ikeda T.* Recent advances in liquid sloshing dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. 2001. V. 54. No. 2. Pp. 133–199.
15. *Rabotnov Yu.N., Suvorova Yu.B.* Rasprostranenie uprugo-plasticheskikh voln v sterzhnyakh i balkakh s uchetom zapazdyvaniya tekuchesti [Propagation of elastic-plastic waves in rods and beams with flow delay]. *PTMTF*. 1968. No. 6. Pp. 193–198. (rus)
16. *Skuchik E.* Prostye i slozhnye kolebatel'nye sistemy [Simple and complex oscillatory systems]. Moscow: Mir, 1971. 552 p. (rus)
17. *Kol'skii G.* Volny napryazhenii v tverdykh telakh [Stress waves in solids]. Moscow, 1955. 192 p. (rus)
18. *Rotenberg R.V.* Podveska avtomobilya [Vehicle suspension]. Moscow, 1972. 395 p. (rus)
19. *Rabotnov Yu.N., Suvorova Yu.V.* Dinamika zhestko-plasticheskoi balki s zapazdyvaniem tekuchesti [Dynamics of rigid-plastic beam with yield delay]. *MTT*. 1968. No. 6. Pp. 78–86. (rus)
20. *Kartopoltsev V.M.* Primenenie bistol'nykh balok v proletnykh stroeniya avtodorozhnykh mostov. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Bistol beams in bridge girders. DSc Abstract]. Leningrad, 1991. 33 p. (rus)

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной 24/1, diamos@mail.ru

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной 24/1, diamos@mail.ru

Authors Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Andrey V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru