

ISSN 1997-0935 (Print)
ISSN 2304-6600 (Online)
vestnikmgsu.ru

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 19 Выпуск 4/2024
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4

ISSN 1997-0935 (Print)
ISSN 2304-6600 (Online)
<http://vestnikmgsu.ru>

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 4
2024**

Основан в 2005 году,
1-й номер вышел в сентябре 2006 г.
Выходит ежемесячно

Сквозной номер 185

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 4
2024**

Founded in 2005,
1st issue was published in September, 2006.
Published monthly

«Вестник МГСУ» — рецензируемый научно-технический журнал по строительству и архитектуре, целями которого являются формирование открытого информационного пространства для обмена результатами научных исследований и мнениями в области строительства между российскими и зарубежными исследователями; привлечение внимания к наиболее актуальным, перспективным и интересным направлениям строительной науки и практики, теории и истории градостроительства, архитектурного творчества.

В основных тематических разделах журнала публикуются оригинальные научные статьи, обзоры, краткие сообщения, статьи по вопросам применения научных достижений в практической деятельности предприятий строительной отрасли, рецензии на актуальные публикации

Тематические рубрики

- Архитектура и градостроительство. Реконструкция и реставрация
- Проектирование и конструирование строительных систем. Строительная механика. Основания и фундаменты, подземные сооружения
- Строительное материаловедение
- Безопасность строительства и городского хозяйства
- Гидравлика. Геотехника. Гидротехническое строительство
- Инженерные системы в строительстве
- Технология и организация строительства. Экономика и управление в строительстве
- Краткие сообщения. Дискуссии и рецензии. Информация

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	23.04.2024.
Подписан в свет	26.04.2024.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 20,56. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 113	

Главный редактор

Валерий Иванович Теличенко, академик, первый вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, советник, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

Армен Завенович Тер-Мартirosян, д-р техн. наук, проректор, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Вера Владимировна Галишикова, д-р техн. наук, доц., проф. каф. железобетонных и каменных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционная коллегия

Павел Алексеевич Акимов, д-р техн. наук, проф., академик Российской академии архитектуры и строительных наук, ректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Петр Банашук, д-р, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

Александр Тевьетевич Беккер, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., директор инженерной школы, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Дальневосточная региональная организация Российской академии архитектуры и строительных наук, Владивосток, Российская Федерация

Виталий Васильевич Беликов, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии речных бассейнов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Александр Михайлович Белостоцкий, д-р техн. наук, проф., академик Российской академии архитектуры и строительных наук, научный руководитель, Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Х.Й.Х. Броуэрс, д-р инж. (технические науки, строительные материалы), проф., Технический университет Эйндховена, Королевство Нидерландов (Голландия)

Йост Вальравен, д-р инж. (технические науки, железобетонные конструкции), проф., Технический университет Дельфта, Королевство Нидерландов

Николай Иванович Ватин, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Наталья Григорьевна Верстина, д-р экон. наук, проф., зав. каф. менеджмента и инноваций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Йозеф Вичап, д-р (технические науки, железобетонные конструкции), проф., Университет Жилина, Словацкая Республика

Забигнев Войчицки, д-р (строительная механика), проф., Вроцлавский технологический университет, Республика Польша

Катажина Гладышевска-Федорук, д-р техн. наук, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

Милан Голицки, д-р (технические науки, строительные конструкции), проф., Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

Петр Григорьевич Грабовый, д-р экон. наук, проф., зав. каф. организации строительства и управления недвижимостью, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Станислав Емиоло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Варшавский технологический университет, инженерно-

строительный факультет, Республика Польша

Армен Юрьевич Казарян, д-р искусствоведения, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, директор института архитектуры и градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Рольф Катценбах, д-р инж., проф., Технический университет Дармштадт, Федеративная Республика Германия

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Елена Анатольевна Король, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. жилищно-коммунального комплекса, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Марта Косор-Казербук, д-р техн. наук, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

Сергей Владимирович Кузнецов, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Аркадий Николаевич Ларионов, д-р экон. наук, проф., зав. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Руда Лийас, канд. экон. наук, проф., Таллинский технический университет, Эстония

Инееса Галеевна Лукманова, д-р экон. наук, проф., проф. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Левон Рафаэлович Маилян, д-р техн. наук, проф., академик Российской академии архитектуры и строительных наук, проф. каф. автомобильных дорог, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Николай Павлович Осмоловский, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт системных исследований Польской академии наук, Варшава, Республика Польша

Андрей Будимирович Пономарев, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Российская Федерация

Мирослав Премров, д-р, проф., Мариборский университет, Республика Словения

Светлана Васильевна Самченко, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Владимир Николаевич Сидоров, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «Кибер.Ленинка», UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science), ResearchBib

Председатель редакционного совета

Александр Романович Туснин, д-р техн. наук, проф., зав. каф. металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционный совет

Юрий Владимирович Алексеев, д-р архитектуры, проф., проф. каф. градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Николай Владимирович Баничук, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. механики и оптимизации конструкций, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Игорь Андреевич Бондаренко, д-р архитектуры, проф., акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, директор, Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

Александр Николаевич Власов, д-р техн. наук, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной механики Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

Владимир Геннадьевич Гагарин, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Российская Федерация

Нина Васильевна Данилина, д-р техн. наук, зав. каф. градостроительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Олег Васильевич Кабанцев, д-р техн. наук, доц., директор научно-технических проектов, проф. каф. железобетонных и каменных конструкций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Михаил Николаевич Кирсанов, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Российская Федерация

Елена Юрьевна Куликова, д-р техн. наук, проф. каф. строительства подземных сооружений и шахт, каф. инженерной защиты окружающей среды, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»», Москва, Российская Федерация

Леонид Семенович Ляхович, д-р техн. наук, проф., акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. строительной механики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Российская Федерация

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архи-

тектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Владимир Львович Мондрус, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. строительной и теоретической механики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Андрей Александрович Морозенко, д-р техн. наук, доц., зав. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Надежда Сергеевна Никитина, канд. техн. наук, проф. каф. механики грунтов и геотехники, старший научный сотрудник, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Владимир Александрович Орлов, д-р техн. наук, проф., проф. каф. водоснабжения и водоотведения, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Петр Ян Паль, д-р, проф., Технический университет Берлина, Федеративная Республика Германия

Олег Григорьевич Примин, д-р техн. наук, проф., зам. директора по научным исследованиям, АО «Мосводоканал-НИИпроект», Москва, Российская Федерация

Станислав Владимирович Соболев, д-р техн. наук, проф., проректор, зав. каф. гидротехнических и транспортных сооружений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», Нижний Новгород, Российская Федерация

Михаил Юрьевич Слесарев, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Юрий Андреевич Табунщиков, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, проф. и зав. каф. инженерного оборудования зданий и сооружений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский архитектурный институт (Государственная академия)» (МАРХИ), Москва, Российская Федерация

Владимир Ильич Травуш, д-р техн. наук, проф., акад. и вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, зам. генерального директора, главный конструктор, ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

Виктор Владимирович Тур, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии бетона, Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь; проф., Белостокский технологический университет, Белосток, Республика Польша

Наталья Витальевна Федорова, д-р техн. наук, проф., зав. каф. архитектурно-строительного проектирования, НИУ МГСУ, директор Мытищинского филиала НИУ МГСУ, Мытищи, Российская Федерация

Наталья Николаевна Федорова, д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация

Наталья Юрьевна Яськова, д-р экон. наук, проф., зав. каф. инвестиционно-строительного бизнеса, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

Vestnik MGSU is a peer-reviewed scientific and technical journal whose aims are to publish and disseminate the results of Russian and foreign scientific research to ensure a broad exchange of scientific information, form an open information cluster in the field of construction science and education, enhance the international prestige of Russian construction science and professional education of various levels, introduce innovative technologies in the processes of training professional and scientific personnel in the construction industry and architecture.

The main thematic sections of the journal publish original scientific articles, reviews, brief reports, articles on the application of scientific achievements in the educational process and practical activity of enterprises in the construction industry, reviews of current publications.

Thematic sections

- Architecture and Urban Planning. Reconstruction and Refurbishment
- Construction System Design and Layout Planning. Construction Mechanics. Bases and Foundations, Underground Structures
- Construction Material Engineering
- Safety of Construction and Urban Economy
- Hydraulics. Geotechnique. Hydrotechnical Construction
- Engineering Systems in Construction
- Technology and Organization of Construction. Economics and Management in Construction
- Short Messages. Discussions and Reviews. Information

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	23.04.2024

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2024

Editor-in-Chief

Valery Ivanovich Telichenko, Academician, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief

Armen Z. Ter-Martirosyan, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Vera V. Galishnikova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Editorial Board

Pavel A. Akimov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Alexander T. Bekker, Far Eastern Federal University, Far Eastern Regional Branch of Russian Federation Academy of Architecture and Construction Sciences, Vladivostok, Russian Federation

Vitaliy V. Belikov, Water Problems Institute of Russian Federation Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Aleksandr M. Belostotskiy, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

H.J.H. Brouwers, Eindhoven University of Technology, Kingdom of the Netherlands

Elena A. Korol, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Arkady N. Larionov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Inessa G. Lukmanova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Levon R. Mailyan, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Katarzyna Gladyszewska-Fiedoruk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Petr G. Grabovyy, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Milan Holický, Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, Czech Republic

Stanislav Jemiolo, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Republic of Poland

Rolf Katzenbach, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany

Armen Yu. Kazaryan, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Marta Kosior-Kazberuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Sergey V. Kuznetsov, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russian Federation

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

Nikolai P. Osmolovskii, Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences, Republic of Poland

Andrey B. Ponomarev, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

Svetlana V. Samchenko, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Vladimir N. Sidorov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Nikolay I. Vatin, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

Natalia G. Verstina, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

Russian-English translation: *Ol'ga V. Yudenkova*

Chairman of the Editorial Board

Alexander R. Tusnin, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Editorial Council

Yuri V. Alekseev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Nikolay V. Banichuk, A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russian Federation

Igor A. Bondarenko, Federal State Budgetary Institution “TsNIIP of the Ministry of Construction of Russian Federation”, Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Development (NIITIAG), Moscow, Russian Federation

Nina V. Danilina, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Natalya N. Fedorova, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

Nataliya V. Fedorova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Vladimir G. Gagarin, Scientific-research Institute of building physics Russian Federation Academy of architecture and construction Sciences, Moscow, Russian Federation

Boris. B. Khrustalev, Penza state University of architecture and construction, Penza, Russian Federation

Mikhail N. Kirsanov, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI), Moscow, Russian Federation

Oleg V. Kabantsev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Elena Yu. Kulikova, National Research Technological University “MISiS”, Moscow, Russian Federation

Leonid S. Lyakhovich, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russian Federation

Rashid A. Mangushev, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Vladimir L. Mondrus, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Andrei A. Morozenko, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Nadezhda S. Nikitina, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Vladimir A. Orlov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Peter J. Pahl, Berlin Technical University, Federal Republic of Germany

Oleg G. Primin, “MosVodoKanalNIIProekt” JSC, Moscow, Russian Federation

Stanislav V. Sobol, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Mikhail Yu. Slesarev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Yury A. Tabunschikov, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation

Vladimir I. Travush, CJSC “Gorproject”, Moscow, Russian Federation

Viktor V. Tur, Brest State Technical University Brest, Republic of Belarus; Bialystok University of Technologies, Bialystok, Republic of Poland

Natal'ya Yu. Yas'kova, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

Alexander N. Vlasov, Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО.
РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Е.Ю. Зайкова, С.С. Феофанова
Водочувствительный дизайн городской среды: города-губки и «умные» ландшафты 499

В.Н. Ткачёв
Специфика формирования современных архитектурных концепций 515

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.
СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

А.М. Бударин, Г.И. Ремпель, А.А. Камзолкин, В.Н. Алехин
Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением и повреждением 527

Г.И. Белый, Е.А. Матвеев
Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций 544

А.Г. Тамразян, Йехия Ахмед Котн Сайед
Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках 557

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Т.Н. Черных, К.А. Горбачевских, М.В. Криюшин, А.А. Орлов, М.В. Комелькова, П.О. Платковский
Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона 569

Р.З. Рахимов, Р.Х. Мухаметрахимов, А.Р. Галаутдинов, Л.В. Зиганишина
Гипсоцементно-пуццолановые бетоны для аддитивного строительного производства 580

С.В. Федосов, Б.Е. Нармания
Моделирование влияния параметров массопереноса на кинетику коррозионного взаимодействия бетона с биологическими средами 596

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А.Н. Вихоть
Исследование оползневого процесса в условиях сезонномерзлых грунтов (оползневый склон долины р. Воркута) 606

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.А. Суглобов, Д.В. Миронов, Л.И. Максимов
Технология жизнеобеспечения пляжных глэмпингов с использованием возобновляемой энергии морских волн 618

С.В. Саргсян, В.В. Агафонова
Учет влияния неоднородностей в стеновой панели на величину сопротивления теплопередаче 631

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.И. Беляков
Стратегические направления и предпосылки развития интегрированных структур инвестиционно-строительной деятельности 645

Требования к оформлению научной статьи 656

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Elena Yu. Zaykova, Sofiia S. Feofanova
Water-sensitive urban design: sponge-cities and “smart” landscapes 499

Valentin N. Tkachev
Formation of modern architectural concepts. 515

CONSTRUCTION SYSTEM DESIGN AND LAYOUT PLANNING. CONSTRUCTION MECHANICS. BASES AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

Alexander M. Budarin, Georgy I. Rempel, Alexey A. Kamzolkin, Vladimir N. Alekhin
Concrete damage–plasticity model with double independent hardening. 527

Grigory I. Belyy, Egor A. Matveev
Calculation method improvement of damaged elements of steel structures 544

Ashot G. Tamrazyan, Yehia Ahmed Kotp Sayed
**Comparing moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams with
and without corrosion 557**

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Tamara N. Chernykh, Kirill A. Gorbachevskykh, Mikhail V. Kriushin, Aleksander A. Orlov, Maria V. Komelkova,
Pavel O. Platkovskii*
Biominerall additives for self-healing of concrete 569

Ravil Z. Rakhimov, Rustem Kh. Mukhametrakhimov, Albert R. Galautdinov, Liliya V. Ziganshina
Gypsum-cement-puzzolanic concrete for 3D CP. 580

Sergey V. Fedosov, Boris E. Narmaniya
**Modelling the influence of mass transfer parameters on the kinetics of corrosion interaction of concrete
and biological media 596**

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Anna N. Vikhot
**Study of the landslide process in conditions of seasonally frozen soils (landslide slope of the Vorkuta
river valley) 606**

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Viktor V. Mironov, Yuriy A. Ivanyushin, Daniil A. Suglobov, Dmitriy V. Mironov, Lev I. Maksimov
**Life support technology of beach glamping using renewable energy
of sea waves 618**

Samvel V. Sargsyan, Vera V. Agafonova
Consideration of the effect of inhomogeneities in the wall panel on the value of heat transfer resistance 631

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Sergei I. Beliakov
**Strategic directions and prerequisites for the development of integrated structures in investment
and construction activities 645**

Requirements for research paper design 656

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 4, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 4, 2024

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

В научно-техническом журнале «Вестник МГСУ» публикуются научные материалы по проблемам строительной науки и архитектуры (строительство в России и за рубежом: материалы, оборудование, технологии, методики; архитектура: теория, история, проектирование, реставрация; градостроительство).

Тематический охват соответствует научным специальностям:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки);
- 2.1.9. Строительная механика (технические науки);
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура);
- 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки);
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки);
- 5.2.6. Менеджмент (экономические науки).

По указанным специальностям журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. К рассмотрению и публикации в основных тематических разделах журнала принимаются аналитические материалы, научные статьи, обзоры, рецензии и отзывы на научные публикации по фундаментальным и прикладным вопросам строительства и архитектуры.

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (одностороннее слепое) с участием редсовета и привлечением внешних экспертов — активно публикующихся авторитетных специалистов по соответствующим предметным областям.

Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

In the scientific and technical journal “Vestnik MGSU” Monthly Journal on Construction and Architecture are published the scientific materials on construction science and architectural problems (construction in Russia and abroad; materials, equipment, technologies, methods; architecture: theory, history, design, restoration; urban planning).

The subject matter coverage complies with the approved list of scientific specialties:

Analytical materials, scientific articles, surveys, reviews on scientific publications on fundamental and applied problems of construction and architecture are admitted to examination and publication in the main topic sections of the journal.

All the submitted materials undergo scientific reviewing (double blind) with participation of the editorial board and external experts — actively published competent authorities in the corresponding subject areas.

The review copies or substantiated refusals from publication are provided to the authors and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (upon request). The reviews are deposited in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the main provisions of the existing Russian Legislation concerning copyright, plagiarism and libel, and ethical principles approved by the international community of leading publishers of scientific periodicals and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

Водочувствительный дизайн городской среды: города-губки
и «умные» ландшафты

Елена Юрьевна Зайкова, София Сергеевна Феофанова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В 2023 г. в мире зафиксирован рост случаев подтоплений городов. Количество ливневой воды многократно возросло, но в городах негде применить этот сверхштатный ресурс. Водочувствительный дизайн территорий должен стать приоритетным в планировке городов и обновлении нормативных документов градостроительной сферы в условиях глобального потепления.

Материалы и методы. Приведенный анализ климатических данных территории исследования имеет ключевое значение при вычислении нормы полива для функционирования зеленой инфраструктуры в условиях города. Предложено рассмотреть вегетационный полив — наиболее важное и регулируемое поливное мероприятие, которое жизненно необходимо всем растениям в городских условиях.

Результаты. Управление ливневыми водами сократит затраты на полив и упростит содержание городских зеленых насаждений во время всего вегетационного периода. Предложенные изменения и дополнения нормативных документов Российской Федерации в области зеленой инфраструктуры смогут облегчить внедрение нового экосистемного подхода на практике. Рассмотрены световые условия для качественного функционирования зеленой инфраструктуры на территории исследования.

Выводы. Водочувствительный дизайн городской среды позволяет технологическими средствами имитировать природные процессы, поддерживать природные территории в состоянии устойчивости за счет растений местной флоры, а также может быть естественным образом связан с семантическим образом места, передавать цвет технологиями зеленой инфраструктуры. Авторские биотопы являются устойчивыми технологическими решениями инженерной подготовки территории, разработаны в контексте духа места с использованием растений местной флоры на основе разработанных нормативных рекомендаций в целях новой концепции водочувствительного дизайна городской среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: умные ландшафты, зеленая инфраструктура, ландшафтная инфраструктура, вегетационный полив, норма полива, исторический биотоп, дождевой сад

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Водочувствительный дизайн городской среды: города-губки и «умные» ландшафты // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 499–514. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.499-514

Автор, ответственный за переписку: София Сергеевна Феофанова, sonyafeofanova@mail.ru.

Water-sensitive urban design: sponge-cities and “smart”
landscapes

Elena Yu. Zaykova, Sofia S. Feofanova
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In 2023, an increase in cases of urban flooding was recorded worldwide. The amount of stormwater has increased manifold, but there is nowhere to apply this supernumerary resource in the cities. Water-sensitive design of territories should become a priority in the planning of cities and updating of normative documents of the urban sphere in the face of global warming.

Materials and methods. The given analysis of climatic data of the study area is of key importance in calculating the irrigation rate for the functioning of green infrastructure in urban conditions. It is proposed to consider vegetative irrigation — the most important and regulated watering activity, which is vital for all plants in urban conditions.

Results. Stormwater management will reduce irrigation costs and simplify the maintenance of urban green spaces throughout growing season. The amendments and additions proposed by the authors of the regulatory documents of the Russian Federation in the field of green infrastructure will facilitate the implementation of a new ecosystem approach in practice. The light conditions for the high-quality functioning of the green infrastructure in the study area are also considered.

Conclusions. The author's biotopes are sustainable by technological solutions of engineering preparation of the territory, developed in the context of the spirit of the place using plants of local flora based on the developed regulatory recommendations for the new concept of water-sensitive design of the urban environment.

KEYWORDS: smart landscapes, green infrastructure, landscape infrastructure, vegetation irrigation, irrigation rate, historical biotope, rain garden

FOR CITATION: Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Water-sensitive urban design: sponge-cities and "smart" landscapes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):499-514. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.499-514 (rus.).

Corresponding author: Sofiia S. Feofanova, sonyafeofanova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Затопление территорий — градостроительная проблема, которая стала особенно актуальной в последнее время из-за увеличения частоты ливней. В 2023 г. в мире зафиксирован рост случаев подтопления городов. Количество ливневой воды многократно возросло, но в городах негде применить этот сверхштатный ресурс. Аккумулирование и перераспределение дождевой воды относится к современным технологиям инженерной подготовки территории [1]. И задача градостроительства — научиться управлять процессами урбанизации. Для объяснения, понимания и углубления в эту тему необходимо обратиться к изучению климатических особенностей региона проектирования. Атмосферные явления наблюдаются на всей планете и зависят от количества солнечной радиации, степени наклона солнечных лучей, атмосферного давления, ветрового режима и многих других переменных. Облака — одно из наиболее распространенных и заметных атмосферных явлений, наряду с восходом солнца и радугой после ливня.

Замеры российских ученых [2] показали, что общий уровень осадков на территории России вырос на 1–2 % за последние 50 лет и при этом соотношение типов дождей радикально изменилось. Резко выросла частота и интенсивность ливневых дождей, в некоторых южных регионах России доля мощных гроз повышается примерно на 10 % каждые десять лет. Более медленное движение штормов привело к возрастанию количества осадков. Согласно оценкам Росгидромета¹, в 2021 г. на юге России наблюдался «значительный избыток» осадков: в Южном федеральном округе 126 % нормы, в Северо-Кавказском федеральном округе — 132 %. В июле 2023 г. в Сочи за несколько часов выпало 80 мм осадков². В результате такого ливневого «залпа» — характерного признака глобального потепления — подтопило улицы и дома, сошли селевые потоки, повредившие инфраструктуру и транспорт. А в нескольких близлежащих населенных пунктах была проведена эвакуация жителей, так

как уровень воды в р. Хороте достиг отметки «опасное явление»³.

Штормовые предупреждения в Краснодарском крае объявлялись несколько раз за последние пять лет из-за непогоды и возможности появления смерчей. Сейчас эти процессы начали затрагивать и северные широты европейской и азиатской части нашей страны. Так, этим летом Приморский край накрыли волны сильнейших дождей с осадками до 110 мм в сутки⁴, что вызвало массовое затопление на дорогах и придомовых территориях, аварийные отключения электричества на множестве улиц. Также непогода привела к сжиганию грунта, падению деревьев и образованию паводка, после чего в регионе был введен режим чрезвычайной ситуации федерального масштаба.

К сожалению, такие катастрофические последствия стали происходить чаще из-за планировочной неподготовленности городов [3, 4]. Действующие градостроительные нормативные документы составлены в середине XX в. на основе устаревших климатических данных, когда волны тепла и аномальных осадков происходили раз в 50 лет, а риски затопления не учитывались при территориальном планировании. Также площадь городов была значительно меньше настоящей, т.е. процент пронизаемых территорий, в том числе сельскохозяйственного назначения, был выше, а экологическая ситуация — стабильнее [5].

Решением обозначенных градостроительных проблем может стать водочувствительный дизайн городской среды. Сбор излишков атмосферных осадков с пешеходных и транспортных зон и перераспределение ливневых вод на территориях, занятых зеленой инфраструктурой (далее — ЗИФ), повысит устойчивость городов на фоне климатических изменений. Таким образом, водочувствительный дизайн территорий является приоритетным в планировке городов и обновлении нормативных документов градостроительной сферы в условиях глобального потепления.

³ В реке Хороте в Сочи уровень воды повысился до опасной отметки. 2023. URL: <https://tass.ru/proisshestiya/18229575>

⁴ Станет ли лето 2023 года самым дождливым в Приморье за последние годы? 2023. URL: <https://zr.media/news/2023-07-22/stanet-li-leto-2023-goda-samym-dozhdlivym-v-primorie-za-poslednie-gody-2991847>

¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf>

² На Сочи обрушились сильные ливни. 2023. URL: <https://sochi1.ru/text/incidents/2023/07/09/72479324/>

Актуальность темы настоящей статьи подтверждается не только климатическими данными, но и авторитетными исследованиями ученых в мире, которые призывают внедрять «природоориентированные решения» [6] — один из самых эффективных и мало-затратных способов, помогающих сохранять экосистемы и развивать города на их основе.

Городские территории жизненно важно использовать для взаимодействия с водным ресурсом, «падающим с неба» в прямом смысле. Сегодня назрела необходимость внесения изменений в нормативные документы для добавления инструментов устройства открытого дренажа в условиях города. Колоссальное количество атмосферных осадков, дарованных природой, следует возвращать на территории, предназначенные для их усвоения — генерализованные, т.е. адаптированные к широкому диапазону — озера, реки, пруды, и их частные случаи — дождевые сады, биодренажные каналы [7]. Такой подход создает «умные» ландшафты, готовые

принять на себя неудобные для человека погодные условия и сгладить их последствия за счет новых технологических решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ климатических данных территории исследования

В Москве основным типом атмосферных осадков является дождь. По климатическому графику Москвы⁵ среднее количество дождливых дней каждого месяца за 20 лет увеличилось с 9 до 14 (табл. 1). Это соответствует влажному умеренно континен-

⁵ Климатические данные г. Москвы // WeatherOnline. 2023. URL: https://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/city?LANG=en&PLZ=____&PLZN=____&WMO=27612&CO NT=euro&R=0&LEVEL=162®ION=0006&LAND=RS&MOD=tab&ART=TEM&NOREGION=1&FMM=1&FY Y=2022&LMM=12&LYY=2022

Табл. 1. Средние климатические показатели г. Москвы за период с 2000 по 2022 г. и 2023 г.
Table 1. Average climatic indicators of Moscow for the period from 2000 to 2022 and 2023

Показатели Indicators	Период Period	Вегетационный период 175 суток Vegetation season 175 days						
		Апрель April	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October
Норма осадков, мм Precipitation rate, mm	Среднее Average	44	51	75	94	77	65	59
	2023	29	21	70	152	63	10,6	113
Влажность воздуха, % Air humidity, %	Среднее Average	66	65	68	72	74	80	82
	2023	61,5	61,5	67	67,5	65	68	83
Дождливые дни Rainy days	Среднее Average	9	8	11	12	10	11	10
	2023	8	9	7	18	9	3	14
Влажность почвы, % Soil moisture, %	Среднее Average	55	50	45	40	35	50	55
	2023	33	30	25	27	30	22	37
Показатели Indicators	Период Period	Устойчивые морозы Persistent frosts						
		Ноябрь November	Декабрь December	Январь January	Февраль February	Март March		
Норма осадков, мм Precipitation rate, mm	Среднее Average	58	56	42	36	34		
	2023	—	—	28,8	32,7	60,4		
Влажность воздуха, % Air humidity, %	Среднее Average	86	87	85	82	74		
	2023	—	—	84	85,5	83,5		
Дождливые дни Rainy days	Среднее Average	12	12	11	8	8		
	2023	—	—	20	19	22		
Влажность почвы, % Soil moisture, %	Среднее Average	—	—	—	—	—		
	2023	—	—	—	—	—		

тальному климату с сильным влиянием атлантического морского климата и четко выраженной сезонностью. Для климатического обслуживания городов в мире используются обновленные многолетние средние нормы за период 1971–2010 гг. или 1981–2010 гг., в то время как Гидрометцентр России по ряду финансовых и кадровых причин не производит перерасчет норм с 1961–1990 гг. и 1971–2000 гг., что означает отсутствие объективных отечественных современных данных характеристик климата Москвы. Таким образом, изменение климата, рост среднегодовой температуры и количества осадков становится еще более заметным относительно устаревших сведений. За неполный 2023 г. есть уже три месяца, которые превысили норму осадков в 1,5–2 раза. Однако, несмотря на увеличение количества атмосферных осадков, относительная влажность воздуха и почвы снижается. Так сказывается парниковый эффект и отсутствие экосистемного подхода в инженерном устройстве отвода ливневых вод. Неравномерное распределение атмосферных осадков по времени вегетационного периода создает дополнительные трудности для поддержания зеленых насаждений в здоровом виде.

В табл. 1 также приведены данные влажности почвы. Основным типом почв в Москве являются урбаноземы с морфологическими признаками дерново-подзолистей почвы. Урбаноземы сочетают ненарушенную среднюю и нижнюю части профиля и антропогенно нарушенные верхние слои [8]. Нормативная влажность дерново-подзолистых почв составляет 40–50 %. Данные за 2023 г. констатируют снижение средней влажности почвы до 20–30 %, что считается критическим значением. При такой почвенной влажности невозможен рост растений без дополнительного ухода, и это тоже следствие глобального потепления и урбанизации территорий. Иссущение почв настолько значительно, что осенние осадки не вызывают их сквозного промачивания. Для увеличения влажности почвы при благоустройстве городских цветников используется привезенный чернозем. Тогда почвенный состав меняется на урбанозем с морфологическими признаками чернозема, а влажность аккумулятивной функциональной зоны почвы повышается до 50 %. Такой искусственный прием создает конструктозем — последовательно сменяющиеся слои грунта разного гранулометрического состава и насыщенности органическими соединениями, отсыпанные для целей конструирования профиля по аналогу природной модели почвы [9].

Анализ нормативных документов РФ в области ЗИФ

В Постановлении Правительства Москвы «Правила создания, содержания и охраны зеленых на-

саждений и природных сообществ города Москвы»⁶ предписано держать почву под газонами во влажном состоянии на уровне 75 %. Для выполнения установленных показателей созданные конструктоземы следует дополнительно поливать. В нормативных документах указаны различные цели полива:

- посадочный полив — необходим для приживаемости саженцев и травосмесей;
- вегетационный — выполняется по графику для поддержания влажности почвы;
- подкормочный — для ввода минеральных удобрений;
- освежающий — для предохранения растений от иссушения во время жаркой погоды;
- влагозарядковый — позволяет насытить влагой верхние и нижние слои почвы осенью и весной.

В данной статье авторами будет рассматриваться вегетационный полив — наиболее важное и регулируемое поливное мероприятие, которое жизненно необходимо всем растениям в городских условиях. Количество воды для создания оптимальной влажности при поливе называется нормой полива. Действующий Регламент содержания зеленых насаждений I и II категории г. Москвы⁷ для засушливой, жаркой погоды (далее — Регламент) устанавливает нормы и кратность полива в жаркую, засушливую погоду, которая должна определяться с учетом механического состава почвы и ее влажности, степени влаголюбия и засухоустойчивости видов, а также глубины и ширины залегания корневой системы растений (не менее 30 см). Для этого требуется осуществлять полив всех зеленых насаждений площадью примерно 92 млн м² около 55 раз за вегетационный период из-за повышенной температуры воздуха, что будет дополнительно очищать и увлажнять воздух. Однако на практике эти регламенты не выполняются, ухудшая водный и воздушный режимы почвы. Это подтверждается данными мониторинга и многочисленными обращениями граждан в мэрию Москвы и департамент ЖКХ. Неисполнение поливных мероприятий также привело к уплотнению почвенной массы и снижению влагопроницаемости почвы. Изменился и тепловой режим почвы в городе. Увеличилась амплитуда колебаний температуры в течение года при смене сезонов, это отрицательно влияет на выживаемость растений: почва в жаркие дни нагревается в среднем на 3–5° выше оптимальной температуры, а при по-

⁶ Об утверждении Правил создания, содержания и охраны зеленых насаждений и природных сообществ города Москвы : Постановление Правительства Москвы от 10.09.2002 № 743-ПП (редакция, действующая с 01.03.2023). 2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/3638729>

⁷ Об утверждении Регламента по содержанию зеленых насаждений I и II категории города Москвы для засушливой жаркой погоды : Распоряжение Правительства Москвы от 03.12.2010 № 05-14-495/0.

нижении температуры осенью быстрее отдает свое тепло и промерзает [10].

Анализ территории исследования

Исследование авторов проходит в Москве на перекрестке Ленинского проспекта и улиц Обручева и Лобачевского, где в 2021 г. было выполнено благоустройство, в том числе высажены новые деревья и кустарники, уложен рулонный газон. В предыдущей статье авторов была подробно рассмотрена градостроительная ситуация избранной территории и сделан вывод о том, что на территории исследования существует запас места для внедрения ЗИФ [11].

В продолжение исследования оценим состояние зеленых насаждений на территории перекрестка с помощью фотофиксации. Авторами выявлено девять участков фактических зеленых насаждений вдоль улиц рассматриваемого перекрестка до жилой застройки. На рис. 1 представлена фотография от 15 августа 2022 г.⁸, на которой видно неудовлетворительное состояние зеленых насаждений: на участке 3, входящем в особо охраняемые природные территории (ООПТ), газон пожелтел без полива, атмосферных осадков не хватает для полно-

⁸ Панорамы улиц на карте Москвы. 2022. URL: <https://yandex.ru/maps/-/CDaZBP9U>

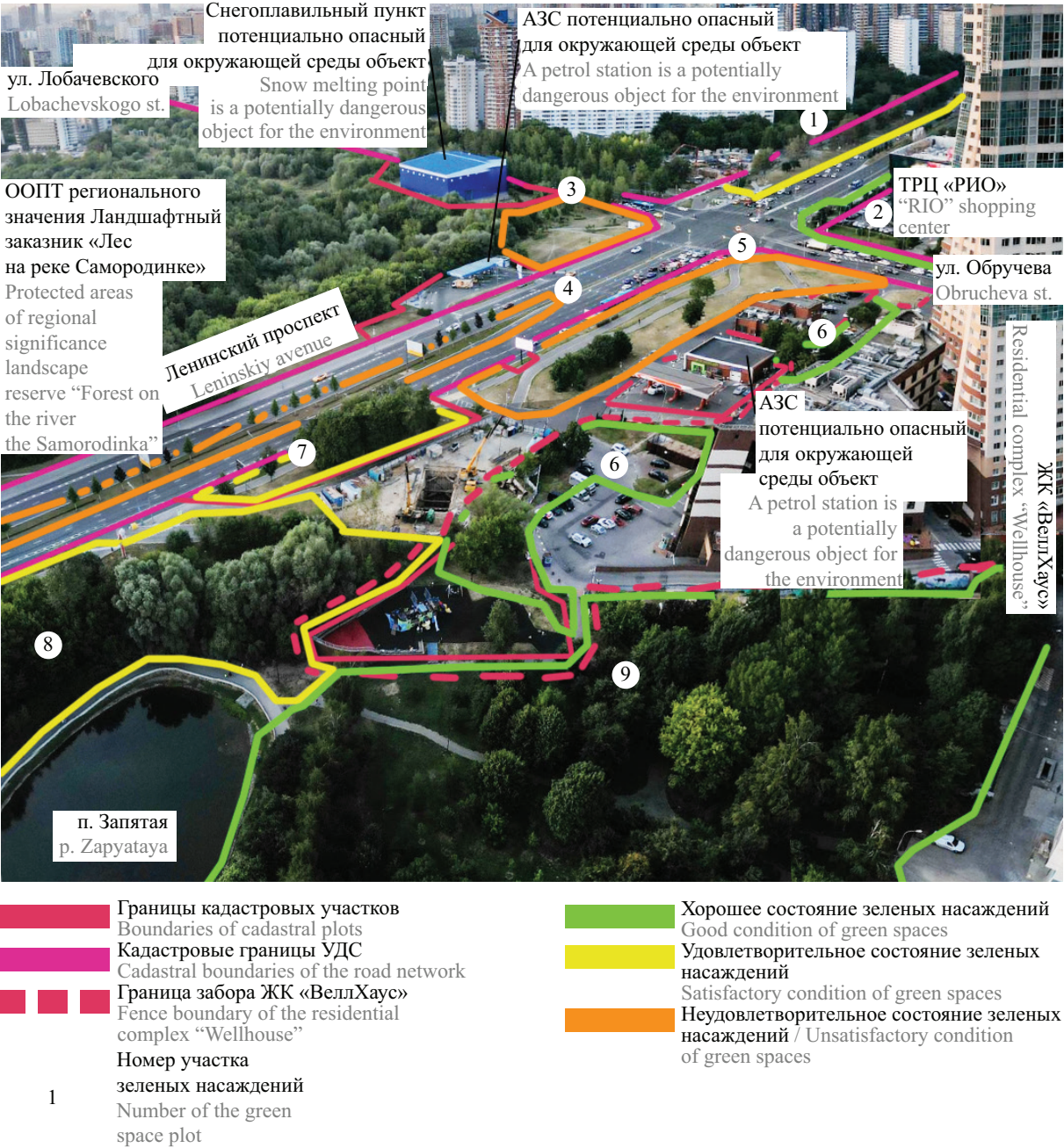


Рис. 1. Фотофиксация существующего состояния озеленения на территории исследования (рисунок авторов)
Fig. 1. Photo fixation of the existing situation of landscaping in the study area (authors' figure)

ценного увлажнения почвы и растительности. Однако на участке 6, где газон располагается за шлагбаумом и относится к ЖК «ВеллХаус», растения выглядят более ухоженными и насыщенными влагой. Существующие зеленые насаждения около перекрестка Ленинского проспекта и улиц Обручева и Лобачевского находятся в том числе на территориях, не имеющих кадастровых границ и номеров. Например, участок зеленых насаждений под номером 5 со стороны ул. Обручева не относится ни к улично-дорожной сети (УДС), ни к парковым зонам. Такая неопределенность вызывает вопрос: кто же ответ-

Табл. 2. Описание состояния зеленых насаждений на территории исследования

Table 2. Description of the condition of green spaces in the study area

Номер участка на рисунке Plot number in the figure	Кадастровый номер Cadastral number	Категория земель Land category	Фактический собственник участка The actual owner of the plot	Визуальная оценка состояния зеленых насаждений Visual assessment of the green spaces' condition
1	77:07:0013007:219	Земли эксплуатации УДС Lands of settlements operating the road network	Городские власти City authorities	Удовлетворительное: газон пожелтел, деревья здоровые Satisfactory: the lawn has turned yellow, the trees are healthy
2	77:06:0003013:137		ТРЦ «РИО» RIO shopping center	Хорошее: склоны рельефа зеленые, деревья здоровые Good: the terrain slopes are green, the trees are healthy
3	77:07:0014008:121	Земли эксплуатации УДС Lands of settlements operating the road network	Городские власти City authorities	Неудовлетворительное: газон пожелтел, кустарники сухие Unsatisfactory: the lawn has turned yellow, the bushes are dry
	77:07:0014008:118			
4	77:07:0014008:121	Для размещения особо охраняемых природных объектов (территорий) For the placement of specially protected natural objects (territories)	Городские власти City authorities	Неудовлетворительное: газон пожелтел, деревья не разрастаются Unsatisfactory: the lawn has turned yellow, the trees are not growing
5	—	—	Нет установленного владельца No established owner	Неудовлетворительное: газон пожелтел Unsatisfactory: the lawn has turned yellow
6	—	—	ЖК «ВеллХаус» Residential complex "Wellhouse"	Хорошее: газон зеленеет, деревья здоровые Good: the terrain slopes are green, the trees are healthy
7	77:06:0006001:11919	Земли населенных пунктов, благоустройство территории Lands of settlements, landscaping	Городские власти City authorities	Удовлетворительное: газон пожелтел, деревья здоровые Satisfactory: the lawn has turned yellow, the trees are healthy
8	77:06:0006001:11222	Земельные участки, занятые городскими лесами, парками Land plots engaged in urban forests, parks	Городские власти City authorities	Удовлетворительное: газон пожелтел, деревья здоровые Satisfactory: the lawn has turned yellow, the trees are healthy
	77:06:0006001:126	Земли эксплуатации УДС Lands of settlements operating the road network		
9	—	—	Нет установленного владельца No established owner	Хорошее: склоны рельефа зеленые, деревья здоровые Good: the terrain slopes are green, the trees are healthy

ственен за благоустройство и содержание территорий зеленых насаждений? Это стало особенно заметно после проведенного благоустройства в 2021 г.: в разделительной полосе между направлениями движения на Ленинском проспекте (участок 4) были высажены новые деревья и кустарники и обновлен бордюрный камень, в то время как зеленые насаждения на этом неразмежеванном кадастровом участке сократились. За счет этих зеленых насаждений, по карте не входящих в УДС, была добавлена полоса движения на проезжей части и расширен тротуар. По нормативам молодые лиственные деревья нужно поливать по 2 раза в неделю, нормой для них будет 50–80 л воды в летний период, однако высаженные пару лет назад деревья и кустарники на участках 3 и 4 так и не достигли размера и диаметра кроны, соответствующего возрасту, а газон пожелтел — все это из-за несоблюдения Регламента и недостатка поливочных мероприятий.

Результат визуальной оценки состояния зеленых насаждений приведен в табл. 2. Треть из обозначенных участков находится в хорошем состоянии, так как частные владельцы зеленых насаждений ответственно подходят к содержанию собственной территории. Еще треть участков зеленых насаждений в неудовлетворительном состоянии, в том числе и территории, входящие в состав ООПТ регионального значения «Лес на реке Самородинке», утвержденной в 2020 г. В удовлетворительном состоянии оставшаяся треть из обозначенных участков с небольшим уклоном рельефа. Эта особенность позволяет участкам 1, 7 и 8 самостоятельно проводить ливневой сток, увеличивать количество впитываемой воды, перемещая ее по уклону рельефа.

Одним из главных препятствий для распределения ливневой воды по участкам зеленых насаждений является высота бордюрного камня, препятствующая отводу воды с дорог и тротуаров. Таким образом, транспортные зоны превращаются в замкнутые емкости без возможности инфильтрации ливневых вод из-за непроницаемых покрытий — асфальта и бетона, а также из-за малой пропускной способности ливневой канализации. Конкретно на территории исследования существует всего 4 элемента «серой» инфраструктуры, которые расположены по направлению ливневого стока. Их максимальная проводимость — до 20 % появляющихся ливневых вод на перекрестке, т.е. ливневки не справляются с возросшим количеством атмосферных осадков [11]. Такое положение снижает качество городской среды несмотря на недавно проведенное благоустройство.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вычисление нормы полива для функционирования ЗИФ

В Регламенте по содержанию зеленых насаждений указываются несколько типов в городе

(табл. 3). Так, у каждого типа зеленых насаждений есть своя поливная норма, но в Регламенте нет дифференциации на виды растений, использующихся в них. Поэтому предложим модели участков зеленых насаждений размером 1 м² с целью проведения расчета средней нормы полива для каждого типа и сравним эти данные с нормативными. Как видно из табл. 3, количество дождливых дней и объем осадков за вегетационный период немного превышают количество дней полива по Регламенту. То есть атмосферные осадки по частоте выпадения и объему примерно равны поливным мероприятиям по Регламенту. Однако некорректно напрямую сравнивать дождь и полив, ведь они должны работать в совокупности и дополнять друг друга. На практике это означает, что растениям нужно меньше воды для полива, чем это указано в Регламенте, но больше воды для питания, чем выпадает атмосферных осадков. Отсюда следует необходимость собирать, направлять, использовать и хранить ливневые воды в зеленых насаждениях города, чтобы компенсировать малое количество поливных мероприятий. Другие нормативные показатели отличаются от фактических в большую сторону, поэтому Регламент нуждается в изменениях, обновлениях и уточнениях.

Произведем расчет поливной нормы по формуле (1) в табл. 3, чтобы вычислить средний объем ливневых вод для выполнения нормы полива по виду растений, л/м². Норма полива на 1 м² площади зеленых насаждений зависит от дефицита запаса почвенной влаги и типа почвы [12]:

$$H = B_{\text{пр}} \cdot (O - P) \cdot \Gamma. \quad (1)$$

Предложения по изменению и дополнению нормативных документов РФ в области ЗИФ

По результатам расчета нормы полива наиболее широкий диапазон требуется для категории «цветники многолетников»: от 2 до 50 л ливневой воды на 1 м². Это значит, что в данном типе зеленых насаждений встречается множество видов растений с разнящейся водопотребностью. Так, например, 5–8 штук растения *вейник остроцветковый* (*Calamagrostis acutiflora*), расположенных на 1 м² конструкторозема при глубине промачивания почвы 10 см для оптимальной влажности 80 %, требуют ежедневно 10,5 л на 1 м². А нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare*) при таких же условиях — 28 л на 1 м². В табл. 4 приведен пример расчета поливной нормы и подходящего биотопа для посадки конкретного растения. Таким образом, необходимо расширить и дополнить понятие из Регламента «Цветники многолетников», заменив его на разновидности биотопов, отличающихся друг от друга по норме полива в 1,5 раза (рис. 2). В зависимости от растения будет определяться вид биотопа посадки со скоростью движения, сбора и хранения ливневых вод по территории.

Табл. 3. Описание переменных для вычисления средней нормы полива каждого из типов зеленых насаждений в городе и сравнение с Регламентом

Table 3. Description of parameters for calculating the average irrigation rate of each type of green spaces in the city and comparison with the Regulations

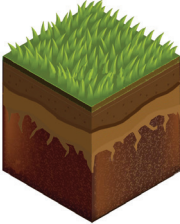
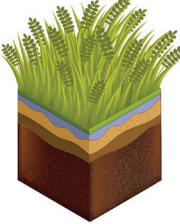
Тип зеленых насаждений Type of green spaces		Газон Grass	Цветники многолетников Flower beds of perennials	Кустарники и живые изгороди Shrubs and hedges	Свободно растущие деревья Free-growing trees
Модель территории Territory model					
Тип почвы Soil type		Конструктозем с морфологическими признаками чернозема A soil-constructor with morphological features of chernozem		Урбанозем с морфологическими признаками дерново-подзолистой почвы Urbanozem with morphological features of sod-podzolic soil	
Коэффициент предельной полевой влагоемкости $B_{пр}$, % Coefficient of marginal field moisture capacity $V_{пр}$, %		35		25–27	26–27
Оптимальная влажность почвы O , % Optimal soil moisture O , %	по регламенту under regulations	75			
	по виду растений by the type of plants	75	80	70–75	65–70
Реальная влажность почвы P , % Real soil moisture R , %	по нормативу under specifications	65		40	
	фактическая actual	50		25	
Глубина увлажнения почвы G , см Depth of soil moisture G , cm	по регламенту under regulations	10	≥ 30	30–50	> 50
	по виду растений by the type of plants	10	5–40	20–30	30–40
Частота полива, дни Watering frequency, days	по регламенту under regulations	20–50	20–50	25–50	50–75
	дождь rain	54–60			
Норма полива H , л/м ² Watering rate H , l/m ²	по регламенту under regulations	20–40	13–30	20–40	30–50
	дождь rain	55–85			
	объем ливневых вод volume of stormwater	8,75	2–50	25–50	25–50

Табл. 4. Расчет поливной нормы и подходящего биотопа для посадки конкретного растения

Table 4. Calculation of irrigation rates and the appropriate biotope for planting a particular plant

Растение Plant	Количе- ство на 1 м ² , шт. Quantity per 1 m ² , pcs.	$V_{пр}$	O	R	G	Водо- потребность, м ³ Water demand, m ³	Водо- потребность, л Water demand, l	Тип биотопа посадки Type of biotope planting	Значок Sign
Медуница Pulmonaria	6–8	0,35	0,8	0,4	0,03	0,0042	4,2	Сухой 1 Dry biotope 1	☐
Вейник остроцвет- ковый Calamagrostis acutiflora	5–8	0,35	0,8	0,5	0,1	0,0105	10,5	Сухой 2 Dry biotope 2	⊘
Молиния Molinia	4–6	0,27	0,75	0,4	0,25	0,02363	23,6	Сухой 3 Dry biotope 3	⊐
Нивяник обыкновенный Leucanthemum vulgare	6	0,35	0,8	0,4	0,2	0,028	28	Полу- влажный Semi-wet biotope	⊑
Дербенник иволистный Lythrum salicaria	4–5	0,35	0,9	0,4	0,4	0,06125	61	Влажный Wet biotope	⊒

Предлагаемые авторами разновидности биотопов относятся к различным типам городских территорий по строению рельефа и наличию инженерных сетей. В устройстве дождевых садов могут быть использованы растения, относящиеся не только к влажному биотопу, но и к полувлажному, для сохранения структуры водоема — мелководных и глубоководных зон [13]. Во избежание риска полного зарастания влажного биотопа следует запланировать глубоководную зону 3 м, поскольку многие разрастающиеся водяные растения растут только до глубины воды около 2 м. Это также создаст жизненные пространства для различных видов животных.

Водопотребность — не единственное условие для нормальной жизнедеятельности растений. Большое влияние оказывают световые условия территории для посадки. Растения делятся на четыре большие группы, отличающиеся по времени инсоляции и характеру затенения (табл. 5). Время инсоляции напрямую отражается на плотности посадки зеленых насаждений. Чем больше солнечных лучей попадает на участок с влаголюбивыми растениями, тем активнее стоит их поливать. Необходимо обращать внимание на длину теней окружающих зданий, их наложения. По итогам инсоляционного анализа территории определяются места для озеленения, разрабатывается дендроплан территории и подбирается цветочный ассортимент. Например, газон относится к светолюбивым растениям, поэтому на теневых участках он редееет, обнажая почву, и теряет насыщенность окраса. В таком случае его следует заменить на тенелюбивые многолетники, которые

защитят почву от эрозии и сохраняют эстетичный вид в течение нескольких лет, а также выполняют другие функции ЗИФ. Световые условия посадки растений не учитываются ни в одном нормативном документе этой области, что является существенным недостатком, подлежащим исправлению.

Применение разработанных рекомендаций на территории исследования

На рис. 3 схематично изображена граница территории исследования и результат применения инсоляционной линейки для определения границы тени от зданий в течение вегетационного периода. Жилой комплекс «ВеллХаус» по адресу Ленинский пр-т, д. 111, корп. 1 высотой около 150 м дает большую часть тени, попадающей на территорию исследования. Данные инсоляционного анализа приведены в табл. 5. Большая часть видов растений для благоустройства этой территории будет относиться к светолюбивым. На рис. 3 авторами предлагается несколько мест для устройства дождевого сада по направлению стока на рельефе территории исследования. Отметим, что охранный зона ООПТ не установлена, по ее краям расположены объекты потенциального загрязнения окружающей среды: снегоплавильный пункт и автомобильная заправочная станция, у которых должны быть собственные охранные зоны. Большинство мест будущего расположения дождевых садов приходится на территорию ООПТ регионального значения ландшафтный заказник «Лес на реке Самородинке» для очищения фиторемедиационными технологиями и попол-

нения водами р. Самородинка после таяния снега и ливневых дождей. В настоящий момент река поч-

ти не протекает, а существует в виде цепочки из четырех декоративных водоемов с бетонированными

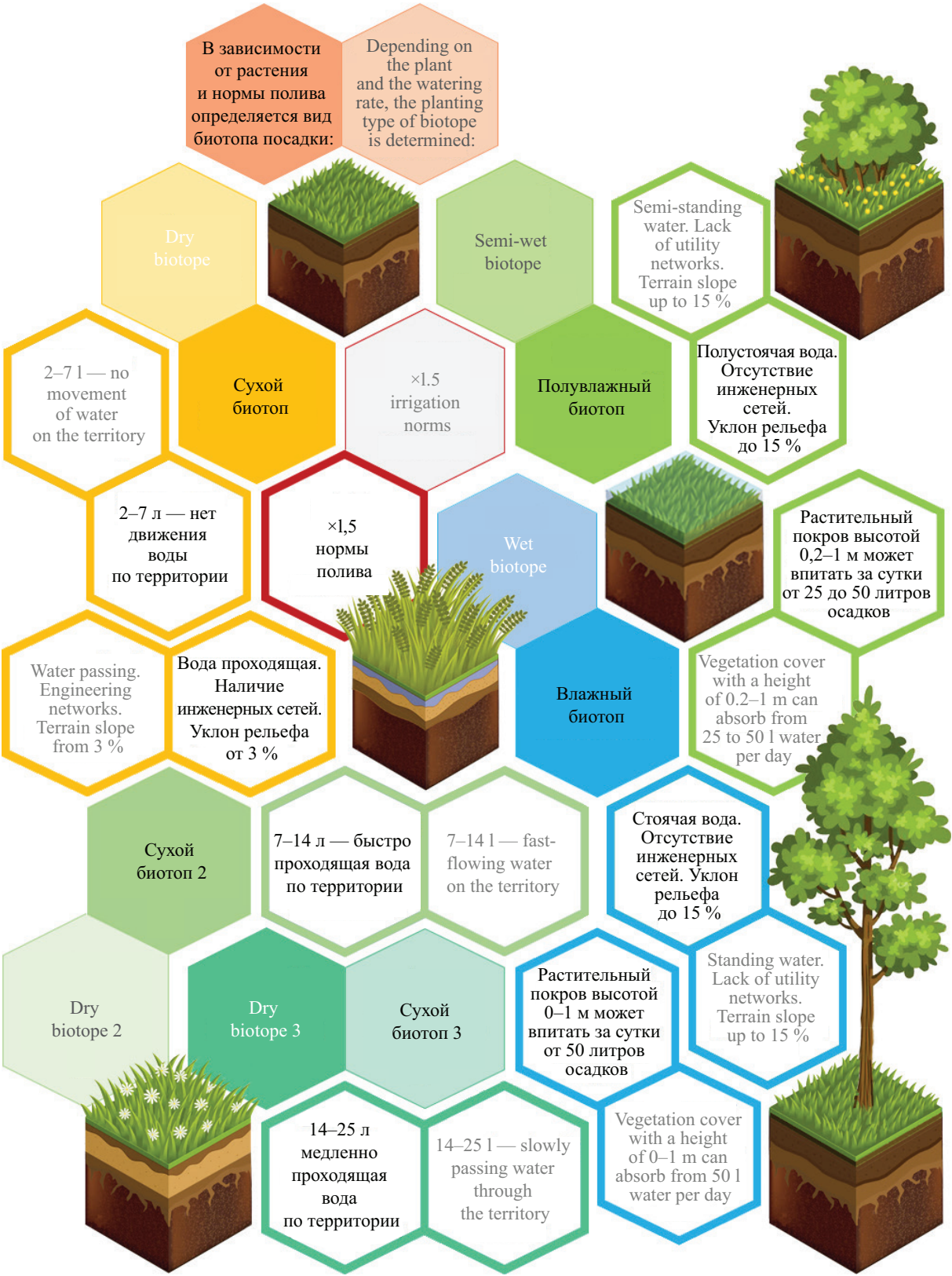


Рис. 2. Схема разновидности биотопов с кратким описанием условий территории для их создания (рисунок авторов)

Fig. 2. The scheme of biotopes' variety with a brief description of the territory conditions for their creation (authors' figure)

Табл. 5. Характеристика световых условий для растений
Table 5. Characteristics of light conditions for plants

Световые условия Light conditions	Освещение солнцем, ч в день Solar illumination, hours per day	Характер затенения территории Characteristics of the territory's shading	Значок Sign	Соотношение участков на территории исследования, % The ratio of plots in the study area, %
Только под солнцем Only under the sun	>6	Открытый участок без тени Open area without shade	○	60
Солнце и полутень Sun and partial shade	3–6	Открытый участок с непродолжительным затенением от зданий или деревьев Open area, with short shading from buildings or trees	○ %	30
Полутень и тень Partial shade and shade	<3	Постоянная тень около корней деревьев Permanent shade near the roots of trees	% ●	5
Только тень Only shade	1–3	Постоянная тень около зданий Permanent shade near buildings	●	5

отвесными берегами⁹. Так, в обход коллекторов и рукотворного пруда Запятая прокладывается Тро-ицкая линия Московского метрополитена.

Создание авторских биотопов в контексте духа места

Для создания биотопов на улицах Москвы рассмотрим исторически сложившуюся совокупность видов растений. В 1826 г. был опубликован «Список растений московской флоры» Михаилом Максимовичем [14], состоящий из 926 наименований. Другая работа коллектива авторов В.Н. Ворошилова, А.К. Скворцова и В.Н. Тихомирова под названием «Определитель растений Московской области» спустя 140 лет насчитывает уже 1312 видов растений [15]. В 2018 г. в «Списке сосудистых растений Московской флоры» [16] приведено 1908 видов, подвидов и гибридов растений, из которых 1006 являются заносными. Такое увеличение объясняется территориальным развитием — территории Московской губернии сейчас в составе Москвы, а границы Москвы и Московской области существенно расширились. Также многие виды были занесены через транспортные пути или семенным материалом спорадически. Описанные растения произрастают на характерных для Москвы и области дерново-подзолистых почвах, а значит приспособлены к быстрому впитыванию воды в почвенную толщу. Можно говорить об имевшихся в Москве собственных «исторических» биотопах, которые имеет смысл

воссоздать заново для восстановления и поддержания природных экосистем.

Выбранный для исследования проспект назван в честь В.И. Ленина — вождя мирового пролетариата и выдающейся личности своего времени, внесшего неоценимый вклад в развитие российского государства. Узнаваемыми символами революционной эпохи являются флаг и звезда красного цвета, как цвета мужества и пролитой крови рабочего класса в борьбе за свою свободу. Передавая славное прошлое революционного движения, именно красный цвет отражает символизм и передает дух места при ассоциации с Ленинским проспектом. Поэтому в представленном перспективном виде дождевого сада (рис. 4) авторы попытались передать семантический образ и запоминаемость среды через модели структуры биотопа, возможности растительности, рельефа места и технологий при водочувствительной реставрации Ленинского проспекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современное глобальное потепление, отчетливо выраженное на территории России, имеет ряд важных особенностей [17]. Территория России теплеет почти вдвое быстрее, чем суша в целом: +0,51 °C за десятилетие, причем каждое десятилетие с 1981–1990 гг. теплее предыдущего, а 9 из 10 самых теплых лет наблюдались в XXI в. Годовые суммы атмосферных осадков на территории РФ демонстрируют устойчивый рост, превышая средние глобальные показатели. Для водных экосистем отмечается и прогнозируется не только изменение стока (годового, сезонного), режима питания рек, учащение экстремальных паводков и маловодий, но также изменение русел, увеличение мутности, повышение температуры и связанное с ним измене-

⁹ Кадастровое дело № 019 «Особо охраняемая природная территория регионального значения ландшафтный заказник «Лес на реке Самородинке». 2020. URL: <https://www.mos.ru/upload/content/files/019KDLZLesnarekeSamorodinke.docx>





Рис. 4. Перспективный вид дождевого сада на территории исследования в июле (рисунок авторов)

Fig. 4. A perspective view of the rain garden in the study area in July (authors' figure)

ние состава и численности гидробионтов и водных растений, внедрение инвазивных видов. Повышение температуры в сочетании с эвтрофикацией приводит к существенному снижению качества воды [18].

Оказать обратное влияние на появившуюся тенденцию может повсеместное внедрение элементов зеленой инфраструктуры. Управление ливневыми водами как основной инструмент водочувствительного дизайна городской среды утверждает экосистемный подход к планированию и использованию территорий.

Проведенный авторами анализ нормативных документов РФ показывает неэффективность использования устаревших данных и технологий для поддержания зеленых насаждений в хорошем виде на улицах городов. Практика других регионов России демонстрирует, что устройство дождевых садов для приема и дальнейшего распределения ливневых вод сочетает высокую эффективность, экологичность, оптимальную стоимость и эстетичный внешний вид [19–22].

Сегодня Москва и ее ближайшие окрестности практически превратились в сплошной антропогенно трансформированный ландшафт, и единственная возможность сохранить биоразнообразие в городе — это создать «умный ландшафт» на основе современных градостроительных решений в инженерной подготовке городской территории. Водочувствительный дизайн городской среды позволяет технологическими средствами имитировать природные процессы, поддерживать природные территории в состоянии устойчивости за счет растений местной флоры, а также может быть естественным образом связан с семантическим образом места, передавать цвет технологиями ЗИФ.

Авторами осуществлен подбор растений для климатической зоны Москвы по условиям морозостойкости, освещенности и водопотребности. Представленные растения используются с целью создания полувлажного и влажного биотопов в дождевых садах для очистки ливневой воды и пополнения р. Самородника, протекающей на территории исследования.

Результаты проведенного исследования в виде предложения новой классификации городских зеленых насаждений и корректировки нормативных показателей вегетационного полива активно повлияют на создание узнаваемого благоустройства с включением природных биотопов разной структуры и гидрофильности в целях комфортной и устойчивой среды для нынешнего и будущего поколений жителей нашей страны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chu X., Campos-Guereta I., Dawson A., Thom N. Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 364. P. 129950. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129950
2. Гинзбург А.И., Лебедев С.А., Шеремет Н.А. Южные моря России. М. : Росгидромет, 2014. 1008 с.
3. Dias F.T., Pereira D.M., Clemente C.M.S., Parma G.O.C., Beattie V.I., de Andrade Guerra J.B.S.O. Environmental challenges to gray cities becoming green cities // *Implementing the UN Sustainable Development Goals — Regional Perspectives*. 2023. Pp. 521–544. DOI: 10.1007/978-3-031-16017-2_2
4. Li H., Zhang C., Chen M., Shen D., Niu Y. Data-driven surrogate modeling: Introducing spatial lag to consider spatial autocorrelation of flooding within urban drainage systems // *Environmental Modelling & Software*. 2023. Vol. 161. P. 105623. DOI: 10.1016/j.envsoft.2023.105623
5. Zhuravlev P., Sborshchikov S., Kochenkova E. Managerial features of the design of technical solutions for engineering protection of the territories during the life cycle and their reengineering // *Building Life-cycle Management. Information Sys-*

tems and Technologies. 2022. Pp. 467–476. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_49

6. *Strassburg B.B.N., Iribarrem A., Beyer H.L., Cordeiro C.L., Crouzeilles R., Jakovac C.C. et al.* Global priority areas for ecosystem restoration // *Nature*. 2020. Vol. 586. Issue 7831. Pp. 724–729. DOI: 10.1038/s41586-020-2784-9

7. *Feofanova S.S., Zaykova E.Y.* Territorial physical and mathematical model of stormwater management // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 403. P. 04003. DOI: 10.1051/e3sconf/202340304003

8. *Литвенкова И.А.* Экология городской среды: урбоэкология : курс лекций. Витебск : Изд-во УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2005. 163 с.

9. *Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А.* Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // *Почвоведение*. 2011. № 5. С. 611–623. EDN NTOPHL.

10. Кузнецов В.А. Почвы и растительность парково-рекреационных ландшафтов Москвы : дис. ... канд. биол. наук. М., 2015. 170 с. EDN MPCSU.

11. *Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С.* Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 11. С. 1429–1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452

12. *Калмыкова А.Л.* Строительство и содержание объектов ландшафтной архитектуры: краткий курс лекций для студентов направления подготовки 35.04.09 «Ландшафтная архитектура». Саратов, 2016. 37 с. URL: <https://www.vavilovsar.ru/files/pages/25758/14725337574.pdf>

13. *Хольцер Й.А., Хольцер К., Калькхоф Й.* Травяные спирали, сады на террасах. Орел : Зенина С.В., 2012. 271 с. EDN QLCSKH.

14. *Максимович М.* Список растений Московской флоры, составленный Михаилом Максимовичем. М. : Университетская типография, 1826. 24 с.

15. *Ворошилов В.Н., Скворцов А.К., Тихомиров В.Н.* Определитель растений Московской области. М. : Наука, 1966.

16. *Щербаков А.В., Любезнова Н.В.* Список со- судистых растений Московской флоры : монография. М. : ООО Галлея-Принт, 2018. 160 с. EDN FMRRLL.

17. *Akaev A., Davydova O.* Climate and energy: energy transition scenarios and global temperature changes based on current technologies and trends // *Reconsidering the Limits to Growth*. 2023. Pp. 53–70. DOI: 10.1007/978-3-031-34999-7_4

18. *Fuso F., Stucchi L., Bonacina L., Fornaroli R., Bocchiola D.* Evaluation of water temperature under changing climate and its effect on river habitat in a regulated Alpine catchment // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 616. P. 128816. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128816

19. *Vitiuk E.Yu.* Biodrainage ditches and rain gardens as improvement tools in a modern city // *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022. Issue 3. DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11

20. *Zaykova E.Y.* Healing landscapes in the multi-functional hybrid objects // *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. 2019. Pp. 347–355.

21. *Zaykova E.* Formation methods of hybrid urban spaces in the historic city center // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 01031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701031

22. *Zaykova E.* Strategies ensuring the stability of natural and urbanized biotopes in hybrid multifunctional objects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012065

Поступила в редакцию 13 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 18 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 11 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Елена Юрьевна Зайкова** — кандидат архитектуры, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 503400, ORCID: 0000-0002-0555-9941; lana_landscape21@mail.ru;

София Сергеевна Феофанова — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8352-1211; sonyafeofanova@mail.ru.

Вклад авторов:

Зайкова Е.Ю. — научное руководство, развитие методологии исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Феофанова С.С. — сбор материала, обработка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций и таблиц.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chu X., Campos-Guereta I., Dawson A., Thom N. Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness. *Construction and Building Materials*. 2023; 364:129950. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129950
2. Ginzburg A.I., Lebedev S.A., Sheremet N.A. *Climate impacts on marine natural systems. Southern seas of Russia*. Moscow, Rosgidromet, 2014; 1008. (rus.).
3. Dias F.T., Pereira D.M., Clemente C.M.S., Parma G.O.C., Beattie V.I., de Andrade Guerra J.B.S.O. Environmental challenges to gray cities becoming green cities. *Implementing the UN Sustainable Development Goals — Regional Perspectives*. 2023; 521-544. DOI: 10.1007/978-3-031-16017-2_2
4. Li H., Zhang C., Chen M., Shen D., Niu Y. Data-driven surrogate modeling: Introducing spatial lag to consider spatial autocorrelation of flooding within urban drainage systems. *Environmental Modelling & Software*. 2023; 161:105623. DOI: 10.1016/j.envsoft.2023.105623
5. Zhuravlev P., Sborshchikov S., Kochenkova E. Managerial features of the design of technical solutions for engineering protection of the territories during the life cycle and their reengineering. *Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies*. 2022; 467-476. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_49
6. Strassburg B.B.N., Iribarrem A., Beyer H.L., Cordeiro C.L., Crouzeilles R., Jakovac C.C. et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*. 2020; 586(7831):724-729. DOI: 10.1038/s41586-020-2784-9
7. Feofanova S.S., Zaykova E.Y. Territorial physical and mathematical model of stormwater management. *E3S Web of Conferences*. 2023; 403:04003. DOI: 10.1051/e3sconf/202340304003
8. Litvenkova I.A. *Ecology of the urban environment: urban ecology : course of lectures*. Vitebsk, Publishing house of the Educational institution “VSU named after P.M. Masherov”, 2005; 163. (rus.).
9. Prokofyeva T.V., Martynenko I.A., Ivannikov F.A. Classification of Moscow soils and parent materials and its possible inclusion in the classification system of Russian soils. *Soil Science*. 2011; 5:611-623. EDN NTOPHL. (rus.).
10. Kuznetsov V.A. *Soils and vegetation of park and recreational landscapes of Moscow : thesis of candi-date of biological sciences*. Moscow, 2015; 170. EDN MIICSY. (rus.).
11. Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Green infrastructure as a stormwater management tool. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1429-1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452 (rus.).
12. Kalmykova A.L. *Construction and maintenance of landscape architecture objects : a short course of lectures for students of the training direction 35.04.09 “Landscape architecture”*. Saratov, 2016; 37. URL: <https://www.vavilovsar.ru/files/pages/25758/14725337574.pdf> (rus.).
13. Khol'tser Y.A., Khol'tser K., Kal'kkhof Y. *Grass spirals, terraced gardens*. Orel, Zenina S.V., 2012; 271. EDN QLCSKH. (rus.).
14. Maksimovich M. *List of plants of the Moscow flora, compiled by Mikhail Maksimovich*. Moscow, University Printing House, 1826; 24. (rus.).
15. Voroshilov V.N., Skvortsov A.K., Tikhomirov V.N. *Determinant of plants of the Moscow region*. Moscow, Nauka, 1966. (rus.).
16. Shcherbakov A.V., Lyubeznova N.V. *List of taxa of vascular plants of Moscow flora : monograph*. Moscow, LLC Galleya-Print, 2018; 160. EDN FMRLL. (rus.).
17. Akaev A., Davydova O. Climate and energy: energy transition scenarios and global temperature changes based on current technologies and trends. *Reconsidering the Limits to Growth*. 2023; 53-70. DOI: 10.1007/978-3-031-34999-7_4
18. Fuso F., Stucchi L., Bonacina L., Fornaroli R., Bocchiola D. Evaluation of water temperature under changing climate and its effect on river habitat in a regulated Alpine catchment. *Journal of Hydrology*. 2023; 616:128816. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128816
19. Vitiuk E.Yu. Biodrainage ditches and rain gardens as improvement tools in a modern city. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022; 3. DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11
20. Zaykova E.Y. Healing landscapes in the multifunctional hybrid objects. *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. 2019; 347-355.
21. Zaykova E. Formation methods of hybrid urban spaces in the historic city center. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701031
22. Zaykova E. Strategies ensuring the stability of natural and urbanized biotopes in hybrid multifunctional objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012065. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012065

Received November 13, 2023.

Adopted in revised form on November 18, 2023.

Approved for publication on January 11, 2024.

B I O N O T E S: **Elena Yu. Zaykova** — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3019-6269, ID RSCI: 503400, ORCID: 0000-0002-0555-9941; lena_landscape21@mail.ru;

Sofia S. Feofanova — postgraduate student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8352-1211; sonyafeofanova@mail.ru.

Contribution of the authors:

Elena Yu. Zaykova — scientific guidance, development of research methodology, scientific text editing, final conclusions.

Sofia S. Feofanova — collecting material, processing material, writing source text, creating illustrations and tables.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72.01:304.44

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.515-526

Специфика формирования современных архитектурных концепций

Валентин Никитович Ткачёв

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы методологического обмена в исследованиях архитектуры и смежных сфер деятельности по изучению проблем взаимодействия человека и среды. Дается критическая оценка ведущих современных направлений архитектурного морфогенеза зарубежных стран и России.

Материалы и методы. На основе изучения причастных к теме теоретических публикаций и натуральных материалов в результате перекрестных сопоставлений объектом исследования стал бином человек + среда, синтезирующий практически все теоретические разработки как основной код взаимодействия. Выявлено, что линии теории и практики в ординарной и репрезентативной архитектуре давно не совпадают и архитектурная теория преобразовалась в схоластическую визионерскую науку, тяготеющую к дизайну. Это подтверждают рассмотренные профессиональные публикации и материалы по существующим и проектируемым архитектурным объектам, а также концептуальные разработки ведущих архитекторов современности.

Результаты. Представлена в сжатом виде генетическая последовательность направлений формирования архитектурной стилистики последних десятилетий с ограничением рассмотрения преимущественно мейнстрима и исключением технических характеристик объектов. Выявлены основные творческие линии и персоналии архитектурных «маэстро» зарубежья, проекция на их деятельность научных направлений и исследовательской методологии современной науки.

Выводы. Отмечена принципиальная разница социальных предпосылок и векторов развития архитектуры зарубежья и России. Даны характеристики позитивным и негативным проявлениям эволюции мировой архитектуры. Отмечена тенденция к формированию парадигмы «интеллектуальной архитектуры», морфологического и технологического предпочтения «чистой формы», минимализма в решении эстетических программ зодчества, укрепления принципов целесообразности, индустриализации, стандартизации в проектировании; высказаны гипотезы по решению проблем поляризации человек-компьютер в будущей архитектурной профессии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектурный морфогенез, генетические цепи, бином человек + среда, деконструктивизм, параметризм, автопоэзис, антропный принцип, эволюция самовоспроизводства архитектурной среды, паттерны жизнеобеспечения, теоретический палимпсест

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ткачёв В.Н. Специфика формирования современных архитектурных концепций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 515–526. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.515-526

Автор, ответственный за переписку: Валентин Никитович Ткачёв, valentintn@mail.ru.

Formation of modern architectural concepts

Valentin N. Tkachev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses issues of methodological exchange in architectural studies and related fields of activities focused on problems of interaction between man and environment. The author makes a critical appraisal of leading modern trends in the architectural morphogenesis in foreign countries and Russia.

Materials and methods. As a result of cross comparisons made within the framework of the study of theoretical publications and full-scale materials, now the human + environment binomial is the subject of research that synthesizes almost all theoretical developments as the main code of interaction. It is clear that lines of theory and practice have not coincided in ordinary and representative architecture for a long time, and architectural theory has been transformed into a scholastic visionary science that tends towards design. This is confirmed by professional publications and materials concerning existing and designed architectural facilities considered during the preparation of the article, as well as conceptual developments made by leading architects of our time.

Results. The genetic sequence of trends in the formation of architectural stylistics typical for the most recent decades is presented in a condensed form, limited to mainstream works, while engineering characteristics of facilities are disregarded. The main creative lines and personalities of foreign “masters” of architecture are identified; present-day areas of research and the research methodology are correlated with their activities.

Conclusions. A fundamental difference is identified between social prerequisites and vectors of architectural development in Russia and worldwide. Characteristics of positive and negative manifestations of evolution of global architecture are listed. A tendency towards formation of a paradigm of “intellectual architecture”, morphological and technological choice of “pure forms”, minimalism in aesthetic programs of architecture, greater importance of principles of expediency, industrialization, standardization in design are identified; hypotheses are made in order to solve problems of human-computer polarization in the future profession of an architect.

KEYWORDS: architectural morphogenesis, genetic chains, man + environment binomial, deconstructivism, parametricism, autopoiesis, anthropic principle, evolution of self-reproduction of architectural environment, life support patterns, theoretical palimpsest

FOR CITATION: Tkachev V.N. Formation of modern architectural concepts. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):515-526. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.515-526 (rus.).

Corresponding author: Valentin N. Tkachev, valentin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Архитектура конца XX – начала XXI в. внесла много изменений в осмысление принципов организации среды обитания от реализации тривиальных требований обеспечения жизнедеятельности человека до осознания воздействия архитектурного пространства на человеческую психику, соматический комфорт, нейрофизиологию обитания в различных средовых условиях (имея в виду и амбициозные намерения выхода за пределы привычного земного мира хотя бы архитектурной имитацией цивилизации космической эры).

Архитектурная теория и правдоподобные компьютерные образы опережают действительный прогресс человечества (рис. 1), может быть, слишком поспешно.

Желанным знаком обновления стала адаптация архитектурной теории к новейшим исследованиям мировой науки, также выходящей на новые горизонты трансцендентных глубин (высот) знания, формирующего цивилизационный потенциал.

Предпосылкой целесообразности применения в архитектуре теоретических методик смежных областей науки стало единство общей направленности исследований в сфере контактов человек – среда, универсальная предустановленность антропного принципа, общность механизма фрактального морфогенеза, действия закономерностей универсума.



Рис. 1. Проект здания библиотеки. Архитектор Фрэнк Гери
Fig. 1. The library building design. By architect Frank Gehry

С другой стороны, термин «архитектура» стал обменным методологическим фондом, пригодным для универсального применения.

В поле зрения данного исследования попали современные теории морфогенеза, аргументированные в своих выводах адекватностью методологических импульсов теорий космофизики, нейрофизиологии, эволюции организмов, социологии, универсума в целом.

Архитектурная теория как прикладная наука, традиционно ориентированная на реализацию ортодоксальных знаний по широкому спектру обеспечения жизнедеятельности (вспомним Витрувия), в последнее время укрепляет связи с фундаментальными науками, обслуживающими как технические, так и гуманитарные сферы деятельности в диапазоне от выявления объективных законов мироздания до исследования социальных микроструктур.

Интеграция методологических систем, значительно расширяющая и углубляющая общий ресурс знания, является мостом, связующим области познания, приближает человечество к заветному «философскому камню».

Теоретический базис настоящего исследования представлен анализом социальных детерминант, стимулирующих адаптацию в архитектуре новых воззрений, преодолевающих научную догматику, помогающих архитектурной теории (и практике) выйти из тупика архаических представлений о роли и задачах архитектуры в современном обществе.

Поразительно, но вместе с тем закономерно, что взаимная адаптация методологий в приложении к архитектуре вскрывает новые ракурсы ее осмысления.

Однако введем ограничение — в данном исследовании приведены только визуальные признаки, не касающиеся технических основ архитектуры, которые тем не менее раскрываются через внешние параметры объектов. Они же внушают обитателям идеи о внутренней организации пространства, которое во многих авангардных проектах представлено интегрированным объемом (рис. 2), пересеченным лестницами, эскалаторами и галереями.

В качестве примеров можно привести популярные детерминации архитектуры как явления



Рис. 2. Венский университет, интерьер атриума. Архитектор Заха Хадид

Fig. 2. University of Vienna, the atrium interior. By architect Zaha Hadid

нелинейного морфогенеза, близкого физическим процессам, или настойчивые попытки «вернуть» экзистенциальные параллели живой природы и искусственного мира.

В первом случае провоцируется наложение философии деконструктивизма [1] на архитектурную практику устранения зависимости от «арханчных» ортогональных форм, статичности, рутинности архитектурных образов. Хочется видеть случайно возникшее, неожиданное, нерукотворное.

В другом — подхватывается идеология «зеленых» с тезисами о создании архитектурных форм, близких природным, без прямых углов, выросших в землю, зооморфных, с педализацией внимания к экологическим аспектам, извращая подлинные идеи экологии.

Заметим, что в серьезных экологических исследованиях нет и намека на архитектурные спекуляции [2].

Понятно, что как форма организации социальной жизни архитектура неизбежно реагирует и более того реверсивно влияет на представления общества о соответствующем ему обитаемом пространстве и наполняющем его предметном реквизите. И значит, является средством создания расчетливо продуманной атмосферы общественной жизни, управляемой понимающими и принимающими решения кадрами. Вмешательство человека в эволюцию полезно тогда, когда он понимает ход процесса и осознает степень необходимости своего участия.

Этот аспект весьма неохотно вскрывается авторами публикаций из опасения обвинений в политизации темы, поскольку разоблачает интересы желающих воспользоваться архитектурой как пятой колонной именно в этом качестве — в ходе культурных контактов или колонизации.

Подключение архитектуры к методологическим приемам смежных наук открывает широкий диапазон средств воздействия на человека; непо-

средственно или исподволь ее образы включаются в систему влияния «иноагентов» на российское общество, его интеллектуальную элиту.

Исповедуемые на Западе философские системы трудно назвать оптимистическими, отсюда и архитектура ближней Европы, тонко реагирующая на метаморфозы западного мышления, носит явный оттенок декаданса, скрытый экстравагантными формами деконструктивизма или «авторских» стилей [3–5].

Некритическое отношение к современному архитектурному опыту Запада (речь только о вызывающих программных творческих замыслах), нередко провоцирующее плагиат, может оттеснить российских архитекторов в арьергард мирового зодчества.

Способствует этому и теоретическая апология современного курса западной архитектуры, возводимой на пьедестал мейнстрима манифестами ее авторов [6].

Завершая введение, подчеркнем еще раз, что закрывать глаза на политическую мотивацию архитектурной эстетики, воспринимаемой даже западными искусствоведами как идеологическую диверсию [7], было бы неосмотрительно, как и на парадоксальную ситуацию откровенного паразитизма западной науки на публикациях российских ученых, зомбированных иллюзорной возможностью представить их зарубежным коллегам, да еще оплатить менеджерам продвижение этого дармового подарка, который для удобства «пользователей» должен быть представлен в компактном виде — не надо тратить на промышленный шпионаж. Или до нас еще не дошло, что за рубежом у нас нет друзей?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

К настоящему времени накоплен объемный материал как в реальной архитектуре, так и ее теоретическом осмыслении.

Натурный материал и проектные гипотезы дают вполне определенную картину направлений мировой архитектурной мысли, перспектив ее реализации.

Произошло смещение акцентов в трактовке архитектуры с явным уклоном в искусствоведческие аспекты, символику, литературные сюжеты, требующие расшифровки.

Существующая образная выразительность среды представляется уже недостаточно эффектно отражающей современность; есть стремление активизировать воздействие архитектуры на сознание обитателей обновлением визуальных качеств.

Но зрелые архитекторы полагают, что с накоплением жизненных функций и факторов внешнего раздражения человек более благосклонно воспринимает нейтральную и спокойную по выразительности среду.

По коммерческим соображениям считается, что интенсивная социальная жизнь должна быть

поддержана активной средой. Архитекторы с азартом принимают креативную суть этого «социально-го заказа», хотя большая часть городского населения не имеет к нему никакого отношения.

Между тем идет безудержное и стихийное наполнение городов «новой архитектурой», игнорируя имеющийся опыт создания ансамблевых композиций.

Сложилось разделение архитектурной практики на реализацию прагматики тривиальных требований обеспечения населения жильем и социальными службами и репрезентативные объекты, акцентирующие выразительность архитектурной среды.

Демонстрация авторского кредо не всегда совпадает с необходимостью гармонизации пространства города, и уникальность архитектурного нововедения не перекрывает неуместность его расположения и стилистики.

Город, конечно, должен обновляться, но не случайными вставками; впрочем, стала привычной практика образования очагов «сити» как коммерческого скопления разнородных сооружений (рис. 3). Коммерческий интерес диктует и оригинальность архитектуры для привлечения туристов. Выросли масштабы сооружений, что сделало неактуальными традиционные приемы художественного решения фасадов их раскреповкой; предпочитают оригинальные силуэтные обобщения, дополняемые динамичностью интерьеров.

Занимаясь частными объектами, архитекторы не заботятся об архитектурном ландшафте города. Он перестал восприниматься как, например, в XVIII в., целостным организмом, и эмоционально выхолащивается, переживая болезнь перехода к стихийному небоскребному столпотворению.

Практически вся послевоенная архитектура XX в. прошла под знаком модернизма. Как его продолжение и в известной мере антипод в игровой, а иногда ироничной манере, реанимировавшей формы классики, в 30-е годы прошлого века заявил о себе постмодернизм, созревший формально и концептуально только к концу века, опираясь на философские теории Ж.Ф. Лиотара, Ж. Бодрийера, Ж. Делеза, Ж. Дерриды, породившие и психоло-

гию деконструктивизма. Каждый этап философской эволюции отражен и в мышлении архитекторов, и, значит, в предметной архитектуре — имея в виду прогресс в генезисе художественных образов среды обитания.

Это упрощенная картина архитектурного морфогенеза до рубежа XX и XXI вв., еще не отрешившегося от уважения к классике, подкрепленного лояльными признаками родства с прошлым.

Резкий перескок мышления на другие орбиты осмысления организованного пространства не как рутинного объекта архаичной строительной деятельности с ее ореолом почтенной старины, а как среды, формы которой воздействуют на психологию современных обитателей архитектурными замыслами, оперирующими нестандартным прочтением функционального задания, тектонических соотношений и даже неожиданностью художественного образа. Образ становится средоточием креативной деятельности архитекторов, полагающихся на возможности строительных технологий в достижении визуальной адекватности сооружения задуманному, нередко рискованному образу.

Перенос акцента с утилитарной фазы реализации объекта, иногда игнорирующей архитектором, на фазу интеллектуального воздействия решения эстетических аспектов составил с тех пор основное поле деятельности архитекторов уже в ипостаси дизайнеров.

Создалась общая моральная атмосфера установления конъюнктуры оценок творческих работ, эффективно самовоспроизводящаяся на конкурсах. Особенность учреждения конкурсов заключается в том, что синклитом уважаемых профессионалов — членов жюри отбирались и паспорттизировались в практику или обновление творческих принципов работы, на которые как эталон ориентировались архитекторы.

Но, кроме того, именно новизна, нетривиальность, неприятие архаики влияли как на коллективное решение жюри, так и на смену творческой парадигмы в работах, настолько поражающих коллег, что рожденная и вынесенная на суд свежая идея становилась всеобщим достоянием и источником новых направлений, новых критериев оценки.

Можно отметить, что анализ поступающей информации о зарубежной архитектуре носит нейтрально описательный или апологетический характер, противопоставляя его героизированной характеристике отечественной архитектуры, решающей совсем другие социальные задачи.

Статья оттеняет оценку архитектурных явлений зарубежья, рожденных духом жесткой конкуренции, высоким цивилизационным потенциалом и спорными эстетическими ориентирами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Если уникальные архитектурные объекты прошлого века представляют собой частные явления



Рис. 3. Международный коммерческий центр, Гонконг

Fig. 3. International business center, Hong Kong

творчества отдельных архитекторов, никак не связанные стилистически и даже противопоставленные в этом смысле друг другу, то в работах современных архитекторов прослеживается корпоративная последовательность, отображающая преемственность и эволюционную логику становления образности.

Удивительно, что творческая кооперация не тиражирует стиль маэстро, а становится плодотворным источником различных направлений в работах участников союза.

Наиболее заметным событием в выстраивании генетических цепочек стала творческая «кухня» Рема Колхаса, Захи Хадид, Патрика Шумахера. Все трое связаны отношениями учитель-ученик.

Рем Колхас начинает творческую деятельность как профессиональный журналист, а к архитектурному труду обращается уже в зрелом возрасте. Он понимал, что только неординарный подход к художественной трактовке образа даст шансы победы в конкурсах.

Интуитивная практика сотрудничества архитектора с компьютером получила профессиональное оформление в творческом направлении, представившем ризому, исходную основу широкого круга последующих явлений, связанных цепочкой последовательных преобразований.

Сегодня Рем Колхас — один из самых признанных архитекторов мира. Напряженная работа в созданной им архитектурной фирме OMA (Offis for Metropolitan Architecture) позволила ему накопить большой проектный материал, послуживший основанием для создания концепции синтезированной работы архитектора и компьютера, которая в упрощенном представлении выглядит как полноценный творческий вклад компьютера в разработку проектной идеи за счет простого приема: преобразование на мониторе визуальной картины методом ее «заражения» вирусом, искажающим изначально заложенный образ и провоцирующим архитектора на поддержание «игры», завершающейся оригинальным проектным решением, дающим впечатление случайности, нерукотворности, отличающимся большой пластичностью и привлекательностью. Обладающий литературным талантом, Р. Колхас оформил находку в виде теории и закрепил таким образом за собой монополию метода [8].

Концепция удачно совместились с общемировым прорывом движения деконструктивизма, идеи которого были аргументированы философией Ж. Дерриды о необходимости разрушения старого для создания нового.

В архитектуре эта философия нашла отражение в отказе от классических форм, преодолении гравитационной тектоники, статичности архитектуры как ее главного признака (рис. 4).

Деконструктивисты, ведомые фанатичной идеей авторской независимости от общественных запросов, свои объекты предьявляли как манифесты

обновления среды, даже унижая ее визуально. Практически вся «авангардная» архитектура в городской среде высокомерно самодостаточна, не участвуя в ее урбанистическом структурировании, перечеркивая градостроительные императивы прошлого. И еще один упрек можно предьявить деконструктивистам — нарушение спокойного ритма сложившейся застройки амбициозными крупномасштабными вторжениями в нейтральную визуальную среду.

Новые идеи вдохновляют архитекторов. И вскоре в бюро OMA органично вписалась энергичная Заха Хадид — сирийский архитектор [9]. В это время в моду входили природоподобные формы, бионика, зооморфная миметика: дома-гнезда, дома-раковины, дома-сферы или подземные лабиринты. И визуализация псевдоприродных форм стала одним из признаков авангардной архитектуры. Метаморфозы природных форм сначала привлекли З. Хадид как средство стихийного достижения эмоциональной выразительности.

Она отеклась от всех достижений архитектуры в тектонике, художественной образности, прочтении функций. Парадокс, но именно это стало залогом ее успехов в архитектурных конкурсах. В процессе «вчувствования» в формы живой природы З. Хадид зашла слишком далеко в имитациях живых существ и самоидентификации с животным, роющим лабиринты и пещеры; тушей кита, выброшенного на берег; младенца, ожидающего своего рождения в утробе — это подробно и талантливо проанализировано Ю.В. Юровской [6].

В понимании З. Хадид пластика формы должна отображать движение, развитие, становление. Отсюда бионические мотивации в моделировании форм и ссылки на подвижность живых тел. Она исключает из рассуждений техническую сторону реализации, рассчитывая на неограниченные возможности индустрии. Многие заказчики, привлеченные вначале ее замыслами, отказывались братья за осуществление ее проектов.

Успех З. Хадид и безоговорочное признание культурной общественностью ее необыкновенного

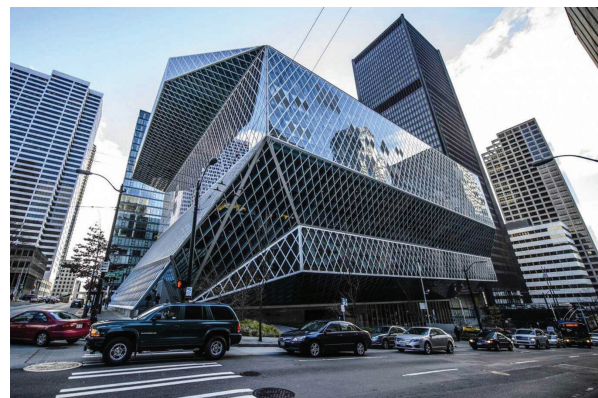


Рис. 4. Здание библиотеки в Сиэтле. Архитектор Рем Колхас
Fig. 4. The library building in Seattle. Designed by architect Rem Koolhaas



Рис. 5. Международный центр культуры и искусства Чанша, Китай

Fig. 5. Changsha Meixihu International Culture and Art Center, China. Designed by architect Zaha Hadid

дарования — классический пример рыночного воздействия на психику, построенного на синтезе нескольких аттрактивных факторов: всеобщее желание обновлений, оригинальность мышления, противостоящего общепринятым нормам, гипнотический, зомбирующий образ южной женщины (рис. 5).

Примеры разрушительной роли личности в истории известны: Александр Македонский, Савонарола, Наполеон, Гитлер, Зеленский... Есть примеры и более простых «заморочек» — покупка бывшим директором Третьяковской галереи двухметровой палки, повешенной на стену.

Феноменология творчества З. Хадид — пространственная динамика пластичных масс. Еще одна особенность ее проектных работ — гигантские по объему интерьеры, пересекаемые лестницами, галереями, пандусами, повлиявшие на творчество других архитекторов, и ввод в архитектурные категории понятия «общественное пространство». Притцкерова премия за проект музея в Цинциннати открыла ей возможность интуитивного творчества в свободной манере, игнорируя материю и технологию. И все же для слишком сложных форм, особенно криволинейных, пришлось прибегнуть к компьютерным расчетам.

Экстравагантные проекты З. Хадид, похоже, достигли предела художественной выразительности своей пластикой, творческий метод стал могильщиком ее манеры мышления, никто не осмеливался подражать ее замыслам, ибо это выглядело бы не только плагиатом, но и дурным вкусом. Женская интуиция лепки скульптурных форм З. Хадид обозначила ее склонность к занятиям дизайном, театрализации интерьеров.

Формалистические эксперименты другого необычного архитектора — Ф. Гэри — также неповторимы, плагиат будет настолько очевидным, что повлияет на репутацию подражателя (рис. 6).

И без этого многие произведения современных зарубежных архитекторов настолько выпадают из общего архитектурного мейнстрима (который тоже непрост в своих амбициях), что возникает

ощущение дьявольского наваждения, намекающего на закат архитектуры как сферы целесообразной деятельности человечества.

Свободные в рисунке и компьютерном изображении прихотливо извивающиеся криволинейные формы для реализации требовали конкретных расчетов — прочностных и в выкройке элементов покрытия, разработки специальных станков с цифровым управлением, дифференциации несущих конструкций и ограждения. Здания из объектов обычной строительной практики, комбинирующей элементы фундаментов, опорных систем, стен и покрытий, в которые привычно вписывались трассы инфраструктуры, превратились в объекты пространственного моделирования на предприятиях сборки. Эти объекты создавались как формы, предназначенные для визуального эффекта. Родился новый стиль — неофутуризм. Уровень развития индустриализации был достаточным, чтобы подключиться к реализации смелых замыслов проектировщиков. Сложилась дееспособная технологическая цепочка: идея — расчет — изготовление — монтаж. Ограничения для осуществления неофутуризма в виде параметризма, т.е. проектирования на основе цифровой технологии формообразования, отступили. Новое направление архитектуры было провозглашено Патриком Шумахером, бывшим студентом З. Хадид, преподававшей в Архитектурной Ассоциации в Лондоне, когда он стал ее сотрудником и последователем развития ее метода.

Термин «параметризм» не очень законен в употреблении, поскольку: 1) исходно он *parametricism*; 2) близок медицинскому термину, обозначающему болезненные послеродовые последствия. Но термин прижился.

После смерти З. Хадид П. Шумахер стал руководителем основанной ею студии Zaha Hadid Architects и оформил в творческий манифест [10] сложившиеся признаки нового архитектурного направления, новых приемов формообразования,



Рис. 6. Концертный зал имени У. Диснея, Торонто. Архитектор Фрэнк Гери

Fig. 6. W. Disney Concert Hall, Toronto. Designed by architect Frank Gehry

опирающихся на топологическую геометрию, возможности вычисления криволинейных и сетчатых структур, полностью меняющих стратегию архитектуры как сферы деятельности. Апологеты «зеленой архитектуры» поспешили заявить, что «параметрическая архитектура дает возможность симулировать логику мышления природы», настаивая пока теоретически на обновлении архитектуры под знаком деконструктивизма или, напротив, на ее возвращении к природным формам (рис. 7).

Общемировой шашбаш экзальтированных архитектурных творений, порожденных необходимостью спастись от инфляции гигантские финансовые накопления, создает впечатление процветания цивилизации, отвлекая человечество от решения насущных проблем экономического и политического дисбаланса.

На Западе ускоряется исторический бег культуры, в которой все чаще появляются признаки вытеснения человека из сферы бытия вообще. Мы сознательно (или бессознательно) готовим яркое, праздничное будущее для роботов, избавивших, как ожидалось, человечество от труда. Создавая для этого архитектурные декорации.

Бесконечно длящийся блеф с инопланетянами, гей-парады, иллюзии красивого, беспечного быта — в этом уже можно заподозрить стихийный противовес грядущему апокалипсису с его молчаливой угрозой катастрофы.

Стремительно нарастают акции по замещению человека машинами (отвлекая его гаджетами), в том числе в архитектуре, технике, медицине и даже в музыке и искусстве, — сценаристы Голливуда уже бастовали по поводу «освобождения» их от работы.

На фоне этой негативной социальной динамики активно продолжают процессы кооперации научных направлений.

Хорошую иллюстрацию методологической согласованности архитектуры с другими науками пред-

ставляет теория аутопоэзиса чилийских философов-биологов У. Матураны и Ф. Варелы, изложенная, в частности, в книге «Древо познания. Биологические корни человеческого понимания». Основные тезисы авторов: «... автономность — одна из наиболее бросающихся в глаза отличительных особенностей живых существ. Мы утверждаем, что механизм, превращающий живые существа в автономные системы, — это аутопоэз. Именно это характеризует их как автономные системы... Бытие и сотворение аутопоэзного единства нерасторжимы, и в этом заключается присущий только им способ организации» [11].

В теории довольно прозрачно угадываются параллели с экзистенциальными проблемами, близкими архитектуре, чем и воспользовался П. Шумахер в аргументации своей концепции «самостийности» архитектуры.

Оценивая общую тенденцию к методологической конвергенции наук, нам тоже имеет смысл задержаться на этой теории внимание.

Теория аутопоэзиса построена на анализе структуры живых организмов, основ их динамичного существования, развития, самовоспроизводства в процессе репродукции, отношений с окружающей средой. Исповедуется главная мысль об автономности самовоссоздания организма — аутопоэзисе, управляемом внутренними потребностями организма, когда внешняя среда оказывает на него влияние только в качестве триггера, катализатора, отдаленно напоминающая позиции А.Н. Северцова, Л.С. Берга, С.Д. Хайтуна [12–14].

При этом сопряжение с внешней средой, определяя жизнеустойчивость, влияет на преобразования как самого организма, так и среды. Уровень взаимодействия, «возмущения» оказывает позитивное влияние на устойчивость организма, усложнение степени его организации, либо, при подавлении процесса репродукции, его гибель.

В целом авторы теории считают, что эволюция организма есть естественный дрейф во времени и пространстве, хотя с учетом неустойчивого баланса самостоятельности он существует «на лезвии бритвы».

Управление внутренними процессами осуществляется нервной системой, сложным взаимодействием сети нейронов. Именно нейронная схема связей формирует «заказ» на необходимый комплекс элементов жизнеобеспечения — пакет паттернов, состав которого достаточно устойчив по номенклатуре и связям; даже клетка в этом смысле представляет миниатюрную фабрику жизни (рис. 8).

Связи организма со средой (оберегая его независимость), его участие в формировании более сложных агрегатов обозначают переход от онтогенеза (единичного развития) к филогенезу, проходя стадии взаимодействия I, II, III порядка.

Авторы отдают себе отчет в том, что при всех особенностях трактовки развития организмы уча-



Рис. 7. Инсталляция Парасоль, г. Севилья. Архитектор П. Шумахер, Бюро Zaha Hadid

Fig. 7. The Parasol Installation, Seville. Designed by architect P. Schumacher, Zaha Hadid Architects

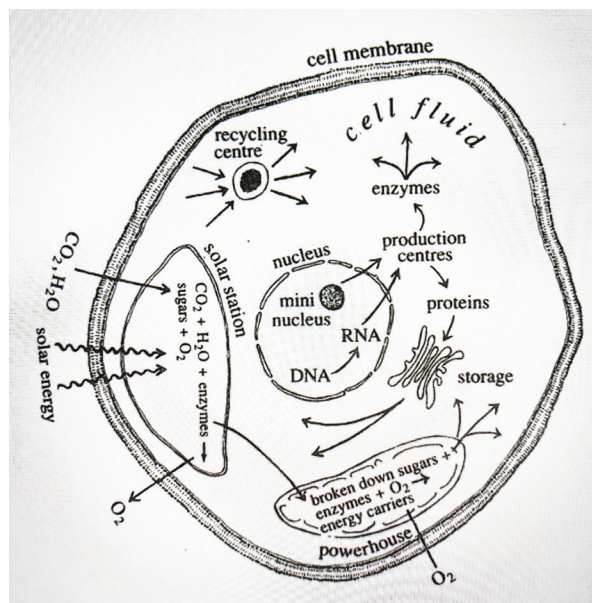


Рис. 8. Клетка — фабрика жизни. Из книги «Древо познания» У. Матурана, Ф. Варела

Fig. 8. The cell as the factory of life. From the book The Tree of Knowledge by W. Maturana, F. Varela

ствуют в общем процессе эволюции живой природы (сопрягаемой, кстати, в этом смысле и с природой косной, с природой искусственно созданной): фрактальном режиме (закон тождества) развития, единства последовательности развития (с различием только в стадиях), ограничении сроков существования вида, предустановленности процессов универсума (линейность эволюции, допускающей скачки, каузальность искажений...).

В целом аутопоэтические системы обладают способностью воспроизводить свои основные компоненты, обеспечивая их связность, упорядоченность, поддерживая тем самым собственную идентичность. Это не исключает изменений внутри системы (даже предусматривает их), появления новых элементов, новых зависимостей, переструктурирования нормативного порядка и т.д.: «Аутопоэзис системы определяет ее биологическую феноменологию — феноменологию, присущую таким системам, особенности которых отличны от физической феноменологии», т.е. авторы как бы отстраняются от анализа тех явлений, которые представляются косными или искусственно созданными.

Здесь следует в общих интересах сделать оговорку.

1. Эволюция живых организмов не отчуждена от универсальной эволюции материи, и большинство «организмов» косной природы участвуют в том же морфогенезе, что и живые системы. Это, например, образование материковых пород за счет многовековых известковых отложений остатков живых организмов.

2. Нейронные сети, управляющие процессами, не являются биологическим фетишем, а пол-

не рационально участвуют в формировании среды обитания точно так же, как это происходит при сопряжении живого организма с внешней средой, что гистологически формализуется в виде ментальных карт или сетевых графиков строительных работ.

Недаром интерпретаторы теории аутопоэзиса удачно проецируют ее методологические находки на архитектурную сферу деятельности, которую мы сводим в бином человек — среда.

Наиболее заманчива возможность подтвердить представления о независимости архитектуры от внешних вмешательств, передергивая авторские постулаты об аутопоэзисе как системе, замкнутой на собственных стимулах преобразований, в область творчества, игнорирующую потребности общества и исходящую только из соображений интерпретаторов. На такой спекуляции построены идеи параметризма, наследующие философские тренды Дерриды и деконструктивистов.

Здесь мы возвращаемся к теории П. Шумахера, заявившего, что написанная им книга «Аутопоэзис архитектуры» (напечатан 1-й том), вдохновленная теорией Матураны и Варелы, должна произвести впечатление «на архитектурную арену путем представления всеобъемлющей (!) теоретической системы». Этой теорией должен стать параметризм.

«Настоятельная потребность в новой масштабной систематизации интеллектуальных ресурсов дисциплины связана с амбициями продвинуть нынешнюю конвергенцию архитектурного авангарда — параметризм — в мейнстрим» [15].

Притом к гегемонии мейнстрима архитектура стремится «на основе собственных потребностей, интересов и критериев значимости». То есть его теория «предназначается только для архитекторов и теоретиков архитектуры». А широкой публике незачем разбираться в архитектурной теории. В качестве примера архитектурного аутопоэзиса он приводит итальянский Ренессанс, утвердивший откровенно дизайнерские начала архитектуры. Так что подлинное лицо П. Шумахера, как дизайнера, обозначено им в отчуждении от «аристократической» архитектуры строительного ремесла и народного зодчества. Добавляется еще сентенция о том, что «не может быть архитектуры без архитектора/автора в качестве точки отсчета».

Отсюда отрицание классической геометрии архитектуры, внимание к театрализации фасадов, объемная артикуляция которых реагирует на нюансы освещения. Короче говоря, существующая монотонность и нейтральность модернизма должны уступить место «экологически адаптивному красноречию параметризма».

Кстати, Матурана, вдохновивший своей теорией Шумахера, не предполагал столь радикальной реакции на ее содержание; он написал, что информация как таковая не составляет направляющую

основу исследования, а только является элементом «селекции».

Но теория параметризма уже живет собственной жизнью и манифест нового стиля продвигает его «в качестве кандидата на то, чтобы стать единым эпохальным стилем 21-го века!».

Технологической базой реализации параметрических проектов криволинейных поверхностей и сетчатых конструкций стали возможности расчетов, основанные на топологическом моделировании в соответствии с триангуляцией Б. Делоне, наложенной на диаграмму Г. Вороного [16]. Наиболее удачными оказались схемы регулярной триангуляции, близкие геометрии сеток Б. Фуллера. Вариации топологического моделирования были впечатляющими, их осуществление гарантировалось точностью расчетов и готовностью заводского изготовления нестандартных по размерам деталей на станках с цифровым управлением — преимущественно криволинейных покрытий и несущих каркасов (рис. 9).

На стройках мастеров-каменщиков заменили рабочие в фирменных спецовках с отвертками в руках, специалисты-сборщики высокой квалификации. Риски от потери качества строящегося сооружения сократились. Сроки тоже.

Параметрическая архитектура настолько очаровала своей новизной и отходом от классических форм, что была заявлена как новейшее и радикальное направление современной архитектуры.

Новая парадигма вкусов порождена «усталостью» от подавляющего обилия ортогональных объектов среды, частично погашаемой дизайном интерьеров и «штучными» включениями эффектной архитектуры.

К идеологии обновления и разрушения «старых» эстетических норм визуального климата добавились тенденции достижения выразительности за счет наклонных стен, острых углов, впечатления нагромождения объемов, ощущения случайности форм, достигаемой «непредсказуемостью» работы компьютера, искажениями, на которые как-то не ре-



Рис. 9. Геодезический купол, фрагмент конструкции. Инженер Б. Фуллер

Fig. 9. Geodetic dome, part of the structure. Designed by B. Fuller, an engineer

шались сами архитекторы, а дигитальное проектирование меняло и психологию отношения к работе над объектом, где господствовала компьютерная беспрекословность.

Отметим и радикальное изменение стратификации кадров в строительной отрасли, понижение социального статуса инженера и архитектора; характерно, что процесс подмены на всех уровнях проектирования человека есть логичная неизбежность индустриализации, за модернизацией которой тоже стоит человек, нагруженный обязательствами максимально активизировать машинную технологию.

Процесс цивилизации, сопровождаемый повышением уровня индустриализации, стандартизации, ускорения работ, исключения или устранения случайностей, выхолащивает из сферы производства человека, которому нужно платить и заботиться о его социальном благополучии, существенно перестраивает структуру производства и общества, «постиндустриальность» которого при всех его прогрессивных качествах выбросила из сферы общественной активности пятую часть работников, а доля предметного производства в ВВП сократилась на одну треть.

При этом постиндустриальное общество как систему не интересуют этически гуманитарные проблемы, но исподволь в СМИ вбрасываются концепции о «мягком» сокращении численности человечества [17–20]. Через призму таких «буферных» концепций изменяется и отношение к нормам организации среды обитания, предметная основа которой — архитектура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном случае заключение не обобщает изложенный материал, а излагает вытекающие из основного текста выводы, имеющие самостоятельное значение.

Как форма деятельности архитектура сегодня не ограничивается задачами создания предметной среды, обладающей каноническими витрувианскими свойствами, предоставляя человеку извне необходимые средства жизнеобеспечения, а включается в непосредственное воздействие на органы чувств, нервную систему, подсознательное ощущение соматического комфорта.

Впечатление, полученное от знакомства с теорией автопозиса, позволяет утверждать, что человек и среда взаимодействуют, синтезируя условия осуществления процесса организации жизни и объединяя их в некую единую сущность.

Взаимная адаптация условий «ближней» среды и органолептических запросов человека формирует в целом единую самоорганизованную систему синестезированного феномена — назовем его «бином человек – среда», —обладающего качествами если не организма, то во всяком случае живой системы,

поскольку она располагает необходимыми для этого компонентами, функционально связанными, замкнутостью в меру самосохранения, но допускающая открытость к контактам, здоровую реакцию на внешние раздражители и т.п.

В биноме угадываются черты нового понимания архитектуры, поднятой на более информативный уровень с традиционной архаической орбиты представлений об архитектуре только как строительном ремесле.

На новых позициях архитектура как объект исследований и предметной корректировки попадает в сферу методологического осмысления дисциплин, также эволюционирующих как живые системы — и это сегодня уже не фигура речи.

Знание в современных науках формируется по общей методологически накатанной схеме, и практически все обновления становятся достоянием всей науки.

То есть если информационные сети развиты достаточно полноценно, то для современной науки в целом образовалась некая новая волна пассионарности и к обновлению информационного поля подключается сразу палимпсест теорий.

Архитектура также становится потребителем нововведений, в какой бы области науки они ни образовались. В результате на архитектуру проецируются все познанные законы мироздания, проявляются ее новые возможности, превышающие тривиальные запросы человечества, в целом растет интеллектуальный уровень бинوما человек + среда. В новом ракурсе трактуется антропный принцип и человек в общей системе мироздания представляет не субъект мичуринской догмы, а компонент бинوما с ограничением прав и увеличением обязанностей. Пора, в частности, преодолеть барьер декларативности в решении экологических проблем и начать погашать долги природе.

Привлечение понятий автопоэзиса, принципов самоорганизации живых систем, включающих и архитектурный феномен бытия материи, дает, как показывают материалы исследования, богатый методологический материал для осмысления и корреляции существующих и прогнозируемых архитектурных событий.

А антропная лексика в ракурсе автопоэзной теории позволяет, не делая скидок на условность понятий, трактовать современное состояние бинوما человек + среда как переход к трансцендентному уровню осознания форм и направлений преобразования средств жизнеобеспечения, уточнения номенклатуры блока паттернов, переоценке соотношения взаимодействия человека и внешней среды в режиме ненасильственного влияния на эволюцию, опираясь на современные представления об экологии в самом серьезном конструктивном понимании и реализации простой, но важнейшей системы ме-

таболизма, практически разрушенной в планетарном масштабе.

Антропный принцип важен как ключевой параметр преобразования среды, которая оценивается прежде всего по визуальным характеристикам. И впечатления о среде складываются по ее внешним достоинствам.

Теоретическая и практическая архитектура сегодня едва соприкасаются. Реальная архитектура на виду, теория остается сферой профессионального информационного обмена и редко доходит до простого горожанина, как и творческие кредо маэстро, капризы заказчиков, эстетические замыслы. И, конечно, в творческие дискуссии знаменитостей рискуют ввязываться немногие, тем более что манифестация замыслов излагается в агрессивной, дерзкой и вызывающей форме. Реальная, не экспозитивная архитектура представлена в тривиальных образах — это хорошо подано на регулярных архитектурных выставках работ российских архитекторов, добившихся качественного роста реализации проектов; уровень отделки, «умные» дома, системы благоустройства, общая эстетика среды — все достойно, без экзальтации (рис. 10).

В теории остается спорной трактовка архитектуры как линейной-нелинейной системы.

Это отголосок общей атмосферы декаданса западной культуры, наложенной на беспокойный морфогенез архитектуры. Понятие нелинейности порождено современной физикой, объявляющей нелинейной любую систему, для которой еще не найдены решения классическими уравнениями. Завтра их найдут.

Неслучайно в пояснениях нелинейности много оговорок, и она расценивается как системный порок. Ибо линейность — это не геометрический символ, а естественный ход эволюции материи и всех происходящих с ней процессов.



Рис. 10. Жилой комплекс «Мякинино парк», г. Москва

Fig. 10. Myakinino Park residential facility, Moscow

Суперпозиция сложилась в оценке линейности-нелинейности, опознание которой зависит от точки зрения наблюдателя: рассматривать архитектурный морфогенез как генеральное линейное направление эволюции или как ряд дискретных явлений, переживающих период деконструкции и вызывающих впечатление нелинейности со всеми ее признаками.

В архитектуре вряд ли есть необходимость заявлять нелинейность, неустойчивость, отвечающие состоянию современного общества как демаскирующие признаки декаданса, спрятанного лозунгами о свободном творчестве, сбросившем «оковы» традиционной ортогональной архитектуры, архаичной эстетики, социальной приемлемости.

В качестве знака неопределенности и амбициозности вульгаризируется символика бытовых процессов, как в свое время в образы зданий включались турбины, шестерни, корабельные корпуса. Это, конечно, издержки образного мышления, намекающие на необходимость возвращения к здравому смыслу. Начать можно с хай-тека.

И последний сюжет заключения.

Неустойчивость современного мира сопровождается вполне устойчивыми в своей направленности процессами вооруженного противостояния, в целом милитаризацией международных отношений, отраженных в пространственной корректировке систем и пограничных сооружений фортификационного назначения, создании эшелонированных оборонных линий в глубине страны, развитии соответствующих производств, не говоря уже о перестройке экономики всей страны. Актуальность проблемы бесспорна, как и необходимость участия в ее решении архитектуры как способа пространственного регулирования нового явления: метаболизма оружия — его изготовления, применения, утилизации.

Западный мир который раз пробует нашу страну на «зуб», используя любые средства и приемы. Наша устойчивость связана в том числе с надежностью строительной отрасли и кадров, отлаженностью пространственных систем всех масштабов и, конечно, структур бинома человек + среда.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Добрицына И.А.* От постмодернизма — к нелинейной архитектуре: архитектура в контексте современной философии. М. : Прогресс-традиция, 2004. 416 с.
2. *Теличенко В.И., Слесарев М.Ю.* «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 558–567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567
3. *Бодрийяр Ж.* Симулякры и симуляция / пер. О.А. Печенкина. Тула : Тульский полиграфист, 2013. 204 с.
4. *Киссель М.А.* Метафизика в век науки: опыт Р.Дж. Коллингууда. СПб. : Искусство-СПб, 2002. 300 с.
5. *Деррида Ж.* Письмо и различие / пер. с фр. под ред. В. Лапицкого. СПб. : Академический проект, 2000. 428 с.
6. *Юровская Ю.В.* «Кинетические морфологии» и их перевод на язык архитектурных форм Захи Хадид // Архитектура и современные информационные технологии. 2022. № 2 (59). С. 58–68. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-58-68. EDN RLBKBN.
7. *Салингарос Н.* Анти-архитектура и деконструкция: триумф нигилизма. М. ; Екатеринбург : Кабинетный ученый, 2017. 296 с. EDN XTVQRQ.
8. *Сипкин П.А.* Творческая концепция Рема Кулхааса: представления, модели, воплощение : автореф. дис. ... канд. арх. М., 2015. 33 с.
9. *Brooks X. Zaha Hadid.* I don't make nice little building // The Guardian. 2013.
10. *Shumacher P.* The autopoiesis of architecture, Volume I: A new framework for architecture. John Wiley & Sons, London, 2011. 478 p.
11. *Матурана У., Варела Ф.* Древо познания: биологические корни человеческого понимания. М. : URSS : ЛЕНАНД, 2019. 316 с.
12. *Северцов А.Н.* Морфологические закономерности эволюции. М. ; Л. : Изд. АН СССР, 1939. 610 с.
13. *Берг Л.С.* Номогенез или эволюция на основе закономерностей. Петроград : Гос. изд-во, 1922. VIII. 306 с.
14. *Хайтун С.Д.* Социум против человека: законы социальной эволюции. М. : URSS : Ленанд, 2006. 333 с.
15. *Schumacher P.* Interview: the autopoiesis of architecture (conversation with Loreto Flores) // Revista de arquitectura. 2011. No. 23.
16. *Скворцов А.В.* Триангуляция Делоне и ее применение. Томск : Издательство Томского университета, 2002. 128 с. EDN RZIMNT.
17. *Белл Д.* Грядущее постиндустриальное общество, культурные противоречия капитализма. М., 1978.
18. *Ласицкая Э.В.* Концепция автопоэзиса: бытие, познание, деятельность // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Философия. Психология. Педагогика. 2011. Т. 11. № 4. С. 14–16. EDN ONGHIL.
19. *Мусеев Н.Н.* Слово о научно-технической революции. М. : Молодая гвардия, 1985. 238 с.

20. Назаретян А.П. Цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории. М. : Россий-

ский гуманитарный научный фонд, 2001. 239 с. EDN YUMNIR.

Поступила в редакцию 20 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 15 января 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Валентин Никитович Ткачёв** — доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры Института архитектуры и градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-5434-6785; valentintn@mail.ru.

REFERENCES

1. Dobritsyna I.A. *From postmodernism to nonlinear architecture: architecture in the context of modern philosophy*. Moscow, Progress-tradition Publ., 2004; 416. (rus.).
2. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. "Green" standardization of technologies for forming the nature-friendly living environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(5):558-567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567 (rus.).
3. Baudrillard J. *Simulakre et simulation*. Tula, Tula Polygraphist, 2013; 204. (rus.).
4. Kissel' M.A. *Metaphysics in the Age of Science: the experience of R.J. Collingwood*. St. Petersburg, Art-SPB Publ., 2002; 300. (rus.).
5. Derrida Zh. *Letter and difference* / transl. from French ed. by V. Lapitsky. St. Petersburg, Academic project Publ., 2000; 428. (rus.).
6. Yurovskaya Yu.V. "Kinetic morphologies" and their translation into Zaha Hadid's language of architectural forms. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022; 2(59):58-68. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-58-68. EDN RLBKBN. (rus.).
7. Salinger N. *Anti-architecture and deconstruction: the triumph of nihilism*. Moscow ; Ekaterinburg, Armchair scientist, 2017; 296. EDN XTVQRQ. (rus.).
8. Sipkin P.A. *The creative concept of Rem Koolhaas: representations, models, embodiment : abstract of the dissertation of the Candidate of Architecture*. Moscow, 2015; 33. (rus.).
9. Brooks X. Zaha Hadid. I don't make nice little building. *The Guardian*. 2013.
10. Shumacher P. *The Autopoiesis of Architecture, Volume I: A New Framework for Architecture*. John Wiley & Sons, London, 2011; 478.
11. Maturana U., Varela F. *The tree of knowledge. Biological roots of human understanding*. Moscow, URSS, LENNAND Publ., 2019; 316. (rus.).
12. Severtsov A.N. *Morphological patterns of evolution*. Moscow; Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1939; 610. (rus.).
13. Berg L.S. *Nomogenesis or evolution based on regularities*. Petrograd, State Publishing House, 1922; VIII:306. (rus.).
14. Haitun S.D. *Society against man. Laws of social evolution*. Moscow, URSS, Lenand Publ., 2006; 333. (rus.).
15. Schumacher P. Interview: the autopoiesis of architecture (conversation with Loreto Flores). *Revista de arquitectura*. 2011; 23. (rus.).
16. Skvortsov A.V. *Delaunay triangulation and its application*. Tomsk, Publishing house of the University, 2002; 128. EDN RZIMNT. (rus.).
17. Bell D. *The coming post-industrial society, cultural contradictions of capitalism*. Moscow, 1978. (rus.).
18. Lasitskaya E.V. The conception of autopoiesis: existence, cognition, activity. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Philosophy. Psychology. Pedagogy*. 2011; 11(4):14-16. EDN ONGHIL. (rus.).
19. Moiseev N.N. *A word about the scientific and technological revolution*. Moscow, Molodaya gvardiya Publ., 1985; 238. (rus.).
20. Nazaretyan A.P. *Civilizational crises in the context of universal history*. Moscow, Russian Humanitarian Scientific Foundation, 2001; 239. EDN YUMNIR. (rus.).

Received November 20, 2023.

Adopted in revised form on November 25, 2023.

Approved for publication on January 15, 2024.

BIONOTES: **Valentin N. Tkachev** — Doctor of Architecture, Professor of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5434-6785; valentintn@mail.ru.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543

Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением и повреждением

Александр Михайлович Бударин¹, Георгий Игоревич Ремпель¹,
Алексей Александрович Камзолкин², Владимир Николаевич Алехин³

¹ Институт Гидропроект; г. Москва, Россия;

² Научно-исследовательский центр «СтаДиО» (НИЦ «СтаДиО»); г. Москва, Россия;

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ);
г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Бетон, будучи неотъемлемой частью современного строительства, представляет собой сложный нелинейный материал. Поведение бетона в значительной степени зависит от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) и истории нагружения. Среди элементов вновь возводимых и реконструируемых зданий и сооружений присутствует большое количество конструкций, работающих в условиях трехосного НДС; а также элементов, подверженных циклическим и знакопеременным нагрузкам. В качестве универсального инструмента, который дает возможность с достаточной точностью описывать работу бетона в подобных условиях, может выступать феноменологическая модель материала, применяемая в рамках численных методов. Цель исследования — разработка модели бетона, позволяющей с достаточной точностью описывать поведение материала в рамках статического кратковременного нагружения. Модель должна отражать ключевые особенности поведения бетона: эффекты контракции и дилатации, изменение жесткости в результате знакопеременного и циклического нагружений, влияние вида напряженного состояния на деформативность материала. Кроме того, модель должна иметь алгоритм регуляризации проблемы локализации необратимых деформаций.

Материалы и методы. В качестве основы используются результаты анализа и систематического обобщения данных, полученных из отечественных и зарубежных источников, посвященных вопросам теории пластичности и механики разрушения бетонных и железобетонных конструкций.

Результаты. Модель реализована в программном конечно-элементном комплексе ANSYS, с помощью которого возможно применять пользовательские модели материала. Проведено сравнение результатов лабораторных и численных испытаний, выполненных для бетонных и железобетонных образцов при различных видах НДС.

Выводы. Представленная модель бетона позволяет с достаточной точностью моделировать поведение материала при различных видах НДС в рамках статического кратковременного нагружения, а также отражает главные особенности поведения материала. Для регуляризации проблемы локализации необратимых деформаций в модели используется подход, основанный на теории полосы трещин. Приведены значения всех параметров, необходимых для использования модели материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, железобетон, теория пластического течения, повреждение, деформационная модель, дилатация, контракция, двойное упрочнение, повреждение, ANSYS

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бударин А.М., Ремпель Г.И., Камзолкин А.А., Алехин В.Н. Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением и повреждением // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 527–543. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Бударин, alex.budarin01@gmail.com.

Concrete damage–plasticity model with double independent hardening

Alexander M. Budarin¹, Georgy I. Rempel¹, Alexey A. Kamzolkin², Vladimir N. Alekhin³

¹ Hydroproject Institute; Moscow, Russian Federation;

² Scientific Research Center “StaDiO” (SRC “StaDiO”); Moscow, Russian Federation;

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU);
Yekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Being an integral part of the modern construction, concrete is a complex nonlinear material. The behaviour of concrete depends to a large extent on stress–strain state and loading history. Among the structures of newly constructed and reconstructed buildings, there are a large number of elements operating in the conditions of the triaxial stress–strain state, alternating and cyclic loading. A phenomenological material model used in the numerical methods can serve as a universal tool that allows to describe the behavior of concrete under such conditions. The aim of the research is to develop the concrete model that allows to simulate material behavior with sufficient accuracy under static short-term loading. The model should reflect the key features, which characterizes the behaviour of concrete and have an algorithm for regularizing the problem of localization of irreversible deformations.

Materials and methods. This research is based on the analytical generalization and systematization of the data received from domestic and foreign sources devoted to the plasticity theory and fracture mechanics of concrete and reinforced concrete.

Results. The model was implemented in the ANSYS finite-element software package, with the help of which it is possible to apply custom material models. Comparison of the laboratory and numerical results for concrete and reinforced concrete was made.

Conclusions. The presented model allows to simulate behavior of concrete with substantial accuracy within the static short-term loading and reflects main features of the material behavior. To regularize the problem of localization of irreversible deformations, the model uses an approach based on the crack band theory. The values of all parameters required for the utilisation of the material model are presented.

KEYWORDS: concrete, reinforced concrete, plasticity theory, damage, deformation model, dilation, contraction, double hardening, ANSYS

FOR CITATION: Budarin A.M., Rempel G.I., Kamzolkin A.A., Alekhin V.N. Concrete damage–plasticity model with double independent hardening. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):527-543. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543 (rus.).

Corresponding author: Alexander M. Budarin, alex.budarin01@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон, будучи неотъемлемой частью современного строительства, представляет собой сложный нелинейный материал. Поведение бетона в значительной степени зависит от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) и истории нагружения. Среди элементов вновь возводимых и реконструируемых зданий и сооружений присутствует большое количество конструкций, работающих в условиях трехосного НДС (массивные части гидротехнических сооружений, атомных станций, узлы сопряжений плитных и вертикальных конструкций и т.д.); а также элементов, подверженных циклическим и знакопеременным нагрузкам (сейсмические, ветровые, волновые воздействия). Задача обоснования прочности и механической безопасности элементов, работающих в подобных условиях, является нетривиальной. Использование аналитических методов расчета для решения подобных задач может привести к неэкономичному, а в ряде случаев и ненадежному техническому решению ввиду их излишнего упрощения.

В качестве универсального инструмента, позволяющего описывать работу бетона в условиях сложного НДС, может выступать нелинейная феноменологическая модель материала, применяемая в рамках численных методов. В зависимости от вида определяющих соотношений, лежащих в основе модели, она может быть отнесена к одной из нескольких групп.

Первую группу составляют работы, в основе которых лежит теория малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина [1]. Модели данной группы устанавливают конечные зависимо-

сти между тензорами напряжений и деформаций. Среди них можно выделить труды Г.А. Гениева [2], Е.С. Лейтеса [3], А.В. Яшина [4] и др. Соотношения, лежащие в основе моделей, не дают возможность описывать случаи разгрузки, а также непропорционального нагружения, что существенно ограничивает границы их применимости [5].

Ко второй группе относятся модели нелинейной упругости. Нелинейное поведение бетона в моделях данной группы описывается путем изменения секущего модуля деформаций без разделения тензора деформаций на упругую и пластическую части. Такой подход применялся в исследованиях Н.И. Карпенко [6], С.Ф. Клованича [7], Х. Купфера [8], Н. Оттосена [9] и др. Модели этой группы просты в использовании и нетребовательны к производительности, однако имеют узкие границы применимости, ограниченные монотонным нагружением в границах опытных данных, по которым строились соотношения модели [10]. Так же, как и теория малых упругопластических деформаций, нелинейная теория упругости не позволяет учитывать влияние остаточных деформаций, возникающих не только при циклическом и знакопеременном нагружении, но и вследствие локальной разгрузки материала при перераспределении усилий.

В настоящее время одним из наиболее популярных подходов для построения моделей бетона является комбинация теории пластического течения и механизма повреждений. Теория пластического течения, получившая современный вид благодаря публикациям Д.С. Друкера [11] и П. Прагера [12], имеет широкие границы применимости, включающие случаи непропорционального нагружения, разгрузки и повторного нагружения материала, случаи локали-

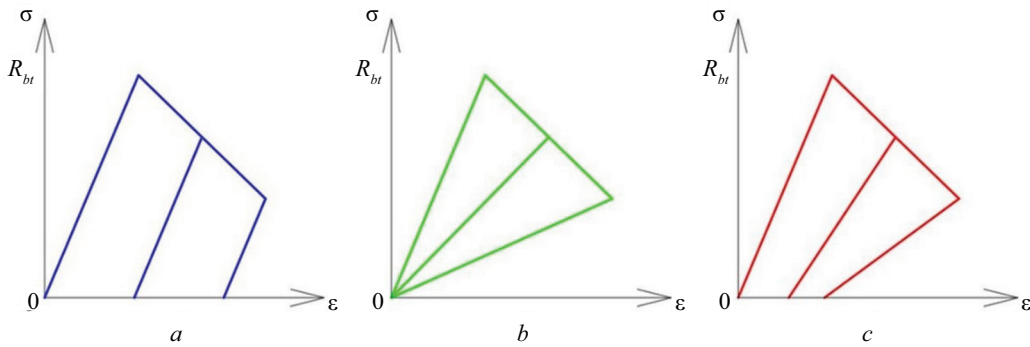


Рис. 1. Соотношения «напряжения – деформации» для моделей бетона, использующих в основе механизмы: *a* — теории пластического течения; *b* — механизм повреждений; *c* — комбинация механизма повреждений и теории пластического течения

Fig. 1. Stress-strain relationship for concrete model using the following mechanics: *a* — plasticity theory; *b* — damage mechanism; *c* — combination of damage mechanism and plasticity theory

зации пластических деформаций. Механизм повреждений, подробно описанный Ю.Н. Работновым [13], дает возможность отражать изменение жесткостных характеристик материала при циклическом и знакопеременном нагружении. На рис. 1 изображены соотношения «напряжения – деформации» для образцов, подверженных циклическому нагружению в условиях одноосного растяжения (серия циклов нагрузка – разгрузка) при условии использования различных механизмов в основе модели.

Подобный подход использовался в работах Д. Ли [14], Г. Этса [15], П. Грассла [16, 17], И. Зреида [18] и др. Однако модели данной группы содержат недостатки, затрудняющие их применение. К основным недостаткам можно отнести:

- значительное отклонение формы поверхности нагружения/прочности от экспериментальных данных;
- недостаточно точная форма поверхности пластического потенциала, не позволяющая правильно отразить эффекты дилатации и контракции;
- отсутствие алгоритмов получения параметров, необходимых для использования модели материала;
- наличие нескольких зон сингулярности в поверхности нагружения, ведущее к ухудшению стабильности решения;
- отсутствие механизма регуляризации проблемы локализации необратимых деформаций, ведущее к зависимости результатов от размера конечно-элементной сетки и ухудшению сходимости задачи при стремлении размера конечного элемента (КЭ) к нулю.

Таким образом, актуальной является задача разработки модели бетона, позволяющей с достаточной точностью описывать поведение материала в рамках различных видов НДС, подверженного статическому кратковременному нагружению. Модель должна отражать основные особенности НДС, характерные для бетона (эффекты дилатации и контракции, изменение жесткости в результате знако-

переменного и циклического нагружения), иметь алгоритм регуляризации проблемы локализации необратимых деформаций. Поверхность нагружения модели должна содержать минимальное количество зон сингулярности.

В статье представлена модификация авторской модели [19], позволяющая расширить границы применимости оригинала. Доработке подвергся механизм разупрочнения (описание процесса разупрочнения происходит с помощью параметров поврежденности), поверхность пластического потенциала и законы упрочнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основы модель использует комбинацию теории пластического течения и механизма повреждений, что отражается на соотношении «напряжения – деформации»:

$$\sigma = (\bar{\sigma}_t \cdot (W_t - 1) + \bar{\sigma}_c) \cdot (W_c - 1), \quad (1)$$

где σ — тензор номинальных напряжений, характеризующий напряженное состояние поврежденного материала; $\bar{\sigma}_t$, $\bar{\sigma}_c$ — положительная и отрицательная части тензора эффективных напряжений, соответственно. Тензор эффективных напряжений описывает напряженное состояние неповрежденного материала и может быть найден согласно уравнению (2); W_t , W_c — скалярные безразмерные параметры поврежденности материала для растяжения и сжатия соответственно. Значения параметров варьируются от 0 (неповрежденный материал) до 1 (полностью поврежденный материал).

$$\bar{\sigma}_t = D_e \cdot (\varepsilon - \varepsilon_p), \quad (2)$$

где D_e — упругая матрица жесткости; ε — тензор деформаций; ε_p — тензор пластических деформаций.

Часть модели, использующая в качестве основы теорию пластического течения, независима от механизма повреждений и включает в себя по-

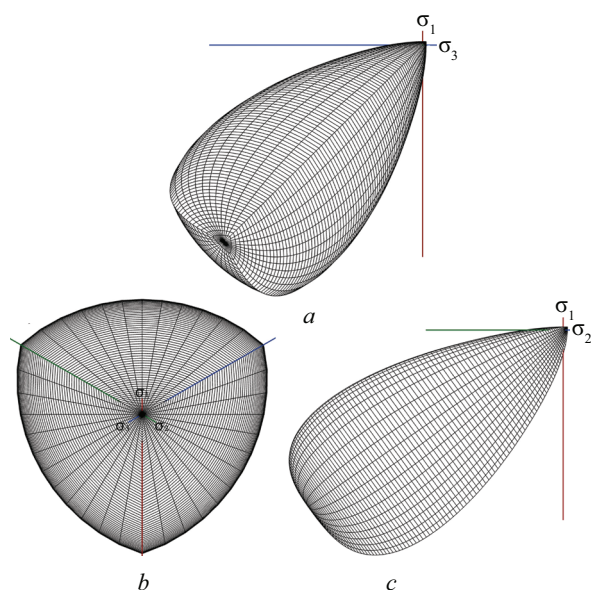


Рис. 2. Поверхность нагружения модели: *a* — вид на плоскость $\sigma_1\text{--}\sigma_3$; *b* — вид на девиаторную плоскость; *c* — вид на плоскость $\sigma_1\text{--}\sigma_2 = \sigma_3$

Fig. 2. Loading surface of the model: *a* — view on plane $\sigma_1\text{--}\sigma_3$; *b* — deviatoric plane view; *c* — view on plane $\sigma_1\text{--}\sigma_2 = \sigma_3$

верхность нагружения, поверхность пластического потенциала и законы упрочнения.

В качестве поверхности нагружения модели применяется поверхность Менетри – Виллама [20], модифицированная авторами путем добавления шатра сжатия. Полученная поверхность нагружения имеет единственную зону сингулярности, расположенную в вершине в зоне трехосного растяжения ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 > 0$). Данная сингулярность не оказывает существенного влияния на стабильность работы модели и регулируется введением дополнительного условия для поверхности пластического потенциала, которое будет описано далее. Девиаторные сечения поверхности, соответствующие разным степеням гидростатического обжатия, не обладают аффинным подобием, что согласуется с опытными данными. Поверхность нагружения изображена на рис. 2.

Модель определена в цилиндрических координатах Хейга – Вестергаарда: гидростатический инвариант p (3); девиаторный инвариант q (4); угол подобия θ (5), находящийся в диапазоне от 0 до 60°:

$$p = I_1 / \sqrt{3}; \quad (3)$$

$$q = \sqrt{2 \cdot J_2}; \quad (4)$$

$$\cos(3 \cdot \theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{J_3}{J_2^{3/2}}. \quad (5)$$

Модифицированное уравнение поверхности нагружения является квадратичной версией уравнения Менетри – Виллама и представлено формулой (6). Следствием использования квадратичной формы

уравнения (6) служит появление мнимой упругой зоны в области трехосного растяжения (рис. 3).

Для решения вышеуказанной проблемы для точек с положительным значением координаты p в качестве уравнения поверхности нагружения используется формула (7). Параметр m , определяющий форму меридионального сечения поверхности нагружения, и эллиптическая функция $r(e, \theta)$, контролирующая форму ее девиаторного сечения, могут быть найдены с помощью формул (8)–(13). $f_{comp}(p)$ — функция, описывающая шатер сжатия поверхности (14):

$$f = \left(\left(\frac{q}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + \frac{c_h \cdot m \cdot q}{\sqrt{6} \cdot R_b} \cdot r(e, \theta) \right)^2 - f_{comp}(p) \cdot \left(c_h - c_h \cdot m \cdot \frac{p}{\sqrt{3} \cdot R_b} \right)^2; \quad (6)$$

$$f = \left(\frac{q}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + c_h \times \times m \cdot \left(\frac{q \cdot r(e, \theta)}{\sqrt{6} \cdot R_b} + \frac{p}{\sqrt{3} \cdot R_b} \right) - c_h; \quad (7)$$

$$r(e, \theta) = \left(4 \cdot C_1 \cdot \cos(\theta)^2 + C_2 \right) / \left(2 \cdot C_1 \cdot \cos(\theta) + C_2 \cdot \sqrt{4 \cdot C_1 \cdot \cos(\theta)^2 + 5 \cdot e^2 - 4 \cdot e} \right); \quad (8)$$

$$C_1 = 1 - e^2; \quad (9)$$

$$C_2 = 2 \cdot e - 1; \quad (10)$$

$$e = \frac{1 + \xi}{2 - \xi}; \quad (11)$$

$$\xi = \frac{R_{bt}}{R_{2b}} \cdot \frac{R_{2b}^2 - R_b^2}{R_b^2 - R_{bt}^2}; \quad (12)$$

$$m = 3 \cdot \frac{R_b^2 - R_{bt}^2}{R_b - R_{bt}} \cdot \frac{e}{e + 1}; \quad (13)$$

$$f_{comp}(p) = 1 - \left(\frac{p - X \cdot R_{vh}}{X(1 - R_{vh})} \right)^2 \cdot H(X - p), \quad (14)$$

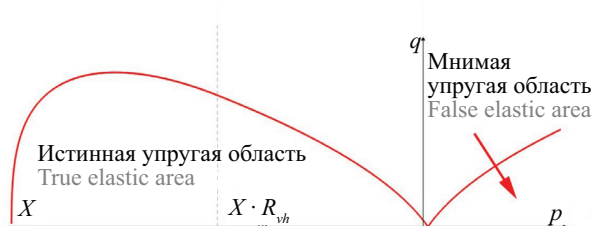


Рис. 3. Меридиональное сечение функции (6)

Fig. 3. Meridional section of the function (6)

где R_b, R_{bt}, R_{2b} — пределы прочности на одноосное сжатие, одноосное растяжение и двухосное равномерное сжатие соответственно. Значение R_{2b} может быть найдено на основании формулы (15) согласно работе [21]; c_h — параметр девиаторной эволюции поверхности нагружения; $H(X-p)$ — функция Хевисайда; X — координата пересечения шатра сжатия с гидростатической осью, МПа; R_{vh} — безразмерный множитель к X , определяющий координату начала шатра сжатия на гидростатической оси. Значение R_{vh} может быть найдено по эмпирической формуле (16) согласно труду [22].

$$R_{2b} = \left(1,2 - \left(\frac{R_b[\text{МПа}]}{1000} \right) \right) \cdot R_b[\text{МПа}], \text{ МПа}; \quad (15)$$

$$R_{vh} = \frac{1}{4,46 \cdot \exp\left(\frac{-R_b[\text{МПа}]}{11,52}\right) + 1,95}, \quad (16)$$

Поверхность пластического потенциала является комбинированной и состоит из трех поверхностей: $g_{shear}, g_{tens}, g_{comp}$ (рис. 4).

Форма поверхности пластического потенциала отвечает за соотношение компонентов тензора пластических деформаций. Для любого вида напряженного состояния это соотношение характеризуется с помощью угла Ψ , представляющего собой угол между вертикалью и нормалью к поверхности пластического потенциала.

Значение угла Ψ устанавливается на основании формулы:

$$\Psi = \text{atan}\left(\frac{\partial g / \partial p}{\partial g / \partial q}\right), \text{ рад}. \quad (17)$$

Условие $\Psi = 0$ соответствует девиаторному нагружению, в рамках которого шаровой тензор пластических деформаций имеет нулевую норму (длину). С ростом абсолютного значения угла Ψ увеличивается доля объемных деформаций в тензоре пластических деформаций.

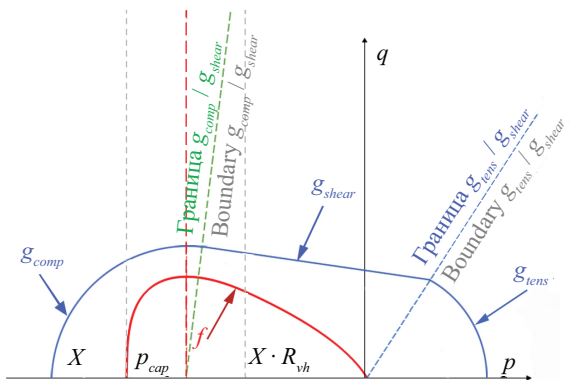


Рис. 4. Комбинированная поверхность пластического потенциала

Fig. 4. Combined surface of plastic potential

Первая поверхность g_{shear} описывается уравнением (18) и позволяет моделировать эффект дилатации:

$$g_{shear} = \frac{r(e, \theta)}{R_b} \cdot \left(q \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + \frac{q}{\sqrt{6}} \cdot m + m_g(p), \quad (18)$$

где $m_g(p)$ — корректирующая функция. Поскольку при вычислении пластического множителя (51) используется не само уравнение пластического потенциала, а его частные производные по инвариантам тензора напряжений, то удобнее вместо функции $m_g(p)$ представить алгоритм вычисления производной функции по гидростатическому инварианту $\partial m_g(p) / \partial p$, значение которой равно производной $\partial g_{shear}(p) / \partial p$. Значение $\partial m_g(p) / \partial p$ может быть вычислено исходя из следующих предпосылок [23]:

1) при одноосном растяжении нормаль к поверхности g_{shear} совпадает с траекторией нагружения, что соответствует условию $\Psi = 1/\sqrt{2}$ рад;

2) при одноосном сжатии угол Ψ равен углу дилатации Ψ_b , значение которого может быть вычислено по формулам (19), (20). Формула (19) построена на основании допущения, согласно которому при достижении поверхности прочности в области одноосного сжатия полные объемные деформации равны нулю:

$$\Psi_b = \frac{R_b \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \sqrt{2}}{|2 \cdot R_b \cdot (\nu + 1) - 3 \cdot \epsilon_0 \cdot E_b|}, \text{ рад}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_0 = & (18 + R_b[\text{МПа}]) \cdot (62 \cdot R_b[\text{МПа}] + \\ & + 0,675 \cdot R_b^2[\text{МПа}] + 22) / (53\,000 - \\ & - 62 \cdot R_b[\text{МПа}] \cdot (7 \cdot R_b[\text{МПа}] + \\ & + R_b^2[\text{МПа}] + 22)), \text{ м/м}, \end{aligned} \quad (20)$$

где ν, E_b — коэффициент Пуассона и модуль упругости соответственно; ϵ_0 — абсолютное значение полных осевых относительных деформаций, соответствующих пределу прочности при одноосном сжатии R_b и вычисляемых на основании работы [6].

Значение производной функции $m_g(p)$ по гидростатическому инварианту p может быть вычислено с помощью формул (21)–(24):

$$\partial m_g(p) / \partial p = A_g \cdot \exp(C_g(p)^2 \cdot B_g); \quad (21)$$

$$A_g = \frac{\sqrt{3} \cdot (R_b \cdot m + 6 \cdot R_{bt} \cdot r(e, \theta))}{6 \cdot R_b}; \quad (22)$$

$$B_g = 3 \cdot \left(\frac{R_b}{R_{bt} + R_b} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{\Psi_b \cdot \sqrt{2} \cdot R_b \cdot (m + 6)}{R_b \cdot m + 6 \cdot R_{bt}} \right); \quad (23)$$

$$C_g(p) = (p - R_{bt} / \sqrt{3}) / R_b. \quad (24)$$

Функция $C_g(p)$ построена таким образом, чтобы принимать значение, равное 0 в области одноосного

растяжения. В этом случае производная $\partial m_g(p)/\partial p$ равна параметру A_g . Значение параметра B_g подбирается так, чтобы в области одноосного сжатия выполнялось условие $\Psi = \Psi_b$.

Для получения радиального возврата на поверхность нагружения необходимо приравнять к нулю производную поверхности g_{shear} по углу подобия θ , используемую в уравнении для вычисления пластического множителя (51). В этом случае поверхность (18) превращается в серию поверхностей, каждая из которых соответствует определенному углу подобия.

Вторая поверхность g_{tens} представляет собой сферу с центром, расположенным в вершине поверхности нагружения в области трехосного растяжения. Данная поверхность применяется для обработки зоны сингулярности и описывается уравнением:

$$g_{tens} = q^2 + (p - R_b \cdot \sqrt{3} / m). \quad (25)$$

Третья поверхность g_{comp} представляет собой сферу и используется для возвращения точки на шатер сжатия. Центр сферы находится на гидростатической оси, при этом p -координата центра p_{cap} является координатой экстремума функции поверхности нагружения (место перегиба функции). Выразив из уравнения (6) координату q , находим производную полученного выражения по координате p . Значение p_{cap} может быть найдено, приравняв числитель полученного выражения к нулю (единственное условие, при котором выражение может быть равно нулю). Результат преобразований — квадратное уравнение, один из корней которого есть искомая величина p_{cap} . Алгоритм получения величины p_{cap} может быть сведен к уравнениям (26)–(29):

$$A = 4 \cdot \sqrt{3} \cdot c_h \cdot m; \quad (26)$$

$$B = -6 \cdot c_h \cdot (\sqrt{3} \cdot X \cdot R_{vh} \cdot m + R_b); \quad (27)$$

$$C = 2\sqrt{3} \cdot c_h \cdot (2 \cdot R_{vh} - 1) \times \\ \times m \cdot X^2 + 6 \cdot R_b \cdot c_h \cdot X \cdot R_{vh}; \quad (28)$$

$$p_{cap} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}, \text{ МПа.} \quad (29)$$

Поверхность g_{comp} описывается уравнением:

$$g_{comp} = q^2 + (p - p_{cap})^2. \quad (30)$$

Переход между поверхностями в рамках комбинированной поверхности пластического потенциала осуществляется с помощью уравнений (31), (32):

$$g = g_{tens}, \text{ если } p > q \cdot \frac{\partial g_{shear} / \partial p}{m / \sqrt{6}} + \frac{R_b \cdot \sqrt{3}}{m}. \quad (31)$$

Условие (31) представляет собой уравнение прямой, проходящей через вершину поверхности нагружения в зоне трехосного растяжения:

$$g = g_{comp}, \text{ если } p_{cap} > p_{g_shear}. \quad (32)$$

Условие (32) заключается в сравнении двух гидростатических координат: p_{cap} — координата центра сферы для возврата на шатер сжатия и p_{g_shear} — гидростатическая координата точки, в которой линия, совпадающая с нормалью к поверхности g_{comp} , пересекает гидростатическую ось. Графическая интерпретация условия (32) приведена на рис. 5.

Значение p_{g_shear} может быть найдено с помощью формул (33)–(35):

$$k_{g_shear} = \frac{\partial g_{shear} / \partial p}{\partial g_{shear} / \partial q}; \quad (33)$$

$$b_{g_shear} = -k_{g_shear} \cdot p_{cap}; \quad (34)$$

$$p_{g_shear} = (q - b_{g_shear}) / k_{g_shear}, \text{ МПа,} \quad (35)$$

где k_{g_shear} — угловой коэффициент прямой, получаемый из формулы (17) на основании условия совпадения угловых коэффициентов рассматриваемой прямой и нормали к поверхности g_{shear} ; b_{g_shear} — свободный член рассматриваемой прямой. Использование данного условия позволяет выполнить плавный переход между поверхностями g_{shear} и g_{comp} , исключая «слепые» зоны, в которые возврат точки невозможен.

В модели используется два независимых механизма эволюции поверхности нагружения: девиаторная эволюция и эволюция шатра сжатия [24, 25]. Девиаторная эволюция представлена дисторсионным упрочнением и выполняется путем изменения безразмерного параметра упрочнения c_h ($c_{h0} \leq c_h \leq 1$). c_{h0} служит начальным значением параметра c_h , соответствующего нижней границе микротрещинообразования материала [26]. Значение параметра c_{h0} может быть найдено по эмпирической формуле (36)

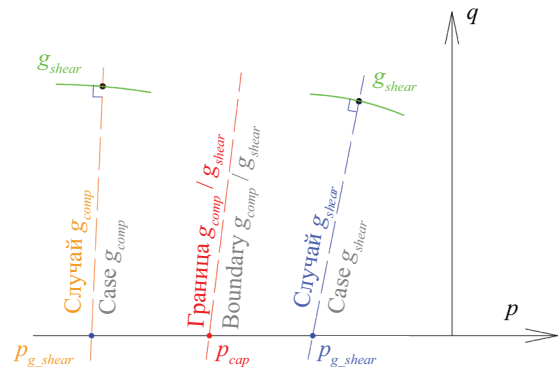


Рис. 5. Графическая интерпретация условия (32)

Fig. 5. Graphical interpretation of the condition (32)

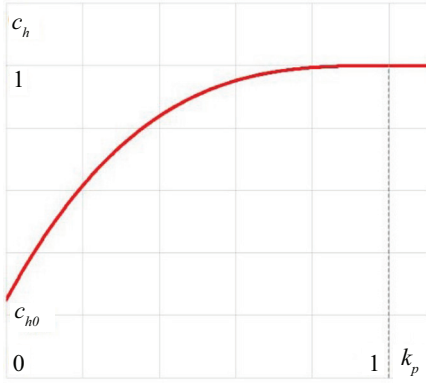


Рис. 6. Геометрическая интерпретация закона девиаторного упрочнения

Fig. 6. Geometric interpretation of deviatoric hardening law

согласно труду [27]. Закон девиаторного упрочнения описывается с помощью системы (37):

$$c_{h0} = \sqrt{1 - \exp(-0,052 \cdot R_b^{0,642} [\text{МПа}])}; \quad (36)$$

$$c_h = \begin{cases} c_{h0} + (1 - c_{h0}) \cdot k_p \cdot (k_p^2 - 3 \cdot k_p + 3), & k_p < 1; \\ 1, & k_p \geq 1. \end{cases} \quad (37)$$

Геометрическая интерпретация закона девиаторного упрочнения представлена на рис. 6.

Параметр c_h является функцией внутренней переменной k_p . Эволюция k_p описывается уравнениями (38)–(41):

$$dk_p = d\lambda \cdot h_D(k_p, \sigma); \quad (38)$$

$$h_D(k_p, \sigma) = \frac{\|\mathbf{m}(k_p, \sigma)\|}{x_h(p) \cdot \beta} \cdot (2 \cdot \cos(\theta))^2 \cdot \chi; \quad (39)$$

$$\beta = 1 + \exp(10 \cdot p/q); \quad (40)$$

$$\chi = \begin{cases} \cos(\Psi_b), & \Psi_b < 0; \\ 1, & \Psi_b \geq 0, \end{cases} \quad (41)$$

где $d\lambda$ — пластический множитель [28]; $\mathbf{m}(k_p, \sigma) = \partial g(\sigma)/\partial \sigma$ — производная поверхности пластического потенциала по тензору напряжений; $x_h(p)$ — коэффициент хрупкости; β — множитель, предотвращающий девиаторную эволюцию поверхности нагружения в области растяжения; χ — множитель, контролирующий девиаторную эволюцию поверхности в случае контракции.

Коэффициент хрупкости контролирует скорость приращения параметра k_p и, соответственно, переменной c_h в зависимости от степени гидростатического обжатия образца. Чем выше степень гидростатического обжатия в образце, тем большая норма тензора пластических деформаций требуется для достижения поверхности нагружения, соответствующей $c_h = 1$ (поверхность прочности). Концепция упрочнения с использованием коэффициента хрупкости была введена Г. Этсем

и К. Вилламом [15]. В данной работе используется авторская модификация закона упрочнения, представленного в работе П. Грассла [16, 17]. Значение $x_h(p)$ может быть получено с помощью формул (42)–(45):

$$R_h = -p / R_b - 1 / \sqrt{3}; \quad (42)$$

$$x_h(p) = \begin{cases} E_h \cdot \exp(-R_h / F_h) + D_h, & R_h < 0; \\ A_h - (A_h - B_h) \cdot \exp(-R_h / C_h), & R_h \geq 0, \end{cases} \quad (43)$$

$$E_h = B_h - D_h; \quad (44)$$

$$F_h = E_h \cdot C_h / (B_h - A_h). \quad (45)$$

Параметры A_h , B_h , C_h , D_h контролируют зависимость коэффициента хрупкости от гидростатического инварианта p . Данные параметры устанавливаются на основании сопоставления результатов численных испытаний с результатами лабораторных испытаний, либо с эталонными осредненными диаграммами, построенными с помощью инженерных методик [29]. В случае отсутствия опытных данных могут быть использованы следующие значения параметров: $A_h = 0,08$, $C_h = 2$, $D_h = 0,000001$. Значение параметра B_h (параметр контролирует норму тензора пластических деформаций при одноосном сжатии) может быть найдено по эмпирической формуле:

$$B_h = 0,0032 - R_b \cdot 0,000015. \quad (46)$$

Графическая интерпретация механизма девиаторной эволюции изображена на рис. 7.

Эволюция шатра сжатия также имеет дисторсионный характер и контролируется внутренней переменной X (координата пересечения шатра сжатия и гидростатической оси). Приращение переменной X зависит от оператора h_v (47), являющегося функцией объемных пластических деформаций ε_{pm} . Эволюция шатра сжатия позволяет смоделировать необратимую сжимаемость бетона (контракцию) [30].

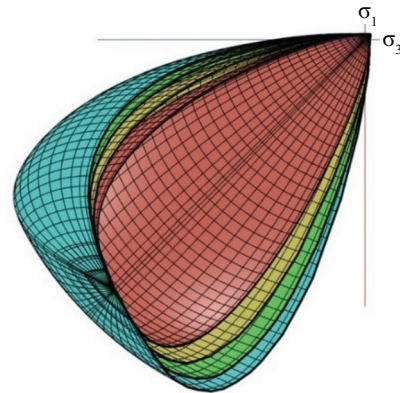


Рис. 7. Механизм девиаторной эволюции поверхности нагружения

Fig. 7. Loading surface deviatoric evolution mechanism

Параметр материала A_{hV} может быть получен на основании уравнения:

$$h_V = A_{hV} = \frac{3 \cdot E_b \cdot (1 - \nu)}{5 \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}. \quad (47)$$

Эволюция внутренней переменной X описывается уравнением (48). Текущее значение переменной X может быть получено на основании уравнения (49). Эволюция шатра сжатия осуществляется при условии $p < p_{cap}$:

$$dX = h_V \cdot d\varepsilon_{pV} = A_{hV} \cdot d\lambda \cdot \delta_{ij} \cdot \mathbf{m}(k_p, \boldsymbol{\sigma}); \quad (48)$$

$$X = X_0 + dX, \text{ МПа}, \quad (49)$$

где δ_{ij} — дельта Кронекера; X_0 — начальное значение X , которое может быть найдено с помощью уравнения (50) на основании исследования [22]:

$$X_0 = -17,1 - 1,89 \cdot R_b [\text{МПа}], \text{ МПа}. \quad (50)$$

Графическая интерпретация механизма эволюции шатра сжатия показана на рис. 8.

Пластический множитель для метода секущих плоскостей (cutting plane algorithm) может быть получен на основании уравнения (51) по аналогии с трудом [31]:

$$d\lambda = \frac{f''}{\mathbf{n}(k_p, \boldsymbol{\sigma}) : \mathbf{D} : \mathbf{m}(k_p, \boldsymbol{\sigma}) - \frac{df''}{dk_p} \cdot h_D - \frac{df''}{dX} \cdot h_V}, \quad (51)$$

где f'' — значение функции поверхности нагружения (6), (7) с пробными значениями координат; $\mathbf{n}(k_p, \boldsymbol{\sigma}) = \partial f(\boldsymbol{\sigma}) / \partial \boldsymbol{\sigma}$ — производная поверхности нагружения по тензору напряжений; $\mathbf{D}$ — матрица жесткости.

Механизм повреждений дает возможность моделировать разупрочнение материала, а также изменение жесткости при циклическом и знакопеременном нагружении. В модели используется следующая концепция механизма повреждений, отраженная

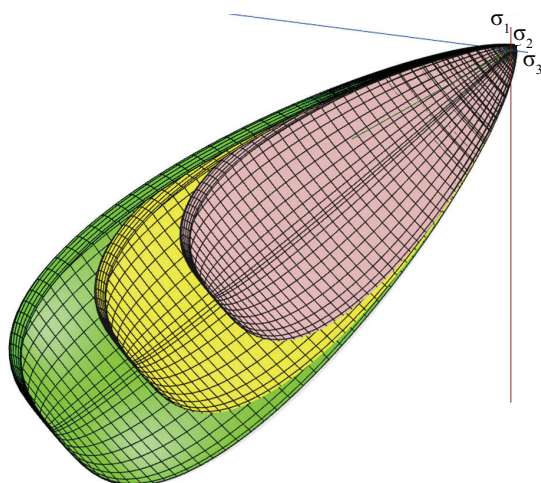


Рис. 8. Механизм эволюции шатра сжатия поверхности нагружения

Fig. 8. Loading surface compression cap evolution

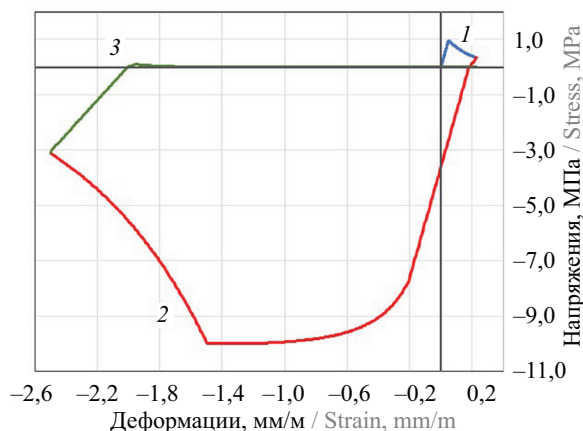


Рис. 9. Работа модели при знакопеременном нагружении в цикле растяжение – сжатие – растяжение

Fig. 9. Model behavior under alternating loading in the tension – compression – tension cycle

в уравнении (1): параметр поврежденности при сжатии W_c (52) влияет на весь тензор напряжений, в то время как параметр поврежденности при растяжении W_t (53) влияет только на его положительную часть. Данный подход позволяет отразить разницу в поведении бетона при сжатии и растяжении при знакопеременном и циклическом нагружениях. На рис. 9 представлено соотношение «напряжения – деформации» для образца, подверженного знакопеременной нагрузке: линия 1 соответствует нагружению в условиях одноосного растяжения; 2 — разгрузка после одноосного растяжения, переходящая в нагрузку в условиях одноосного сжатия; линия 3 — разгрузка после одноосного сжатия, переходящая в одноосное растяжение с остаточным значением предела прочности при одноосном растяжении, уменьшенном в результате роста параметров поврежденности W_t и W_c .

$$W_c = 1 - \exp(-\alpha_{dc} / \varepsilon_{fc}); \quad (52)$$

$$W_t = 1 - \exp(-\alpha_{dt} / \varepsilon_{ft}), \quad (53)$$

где α_{dc} (55), α_{dt} (54) — переменные, отвечающие за эволюцию параметров поврежденности при растяжении и сжатии соответственно [32]; ε_{fc} , ε_{ft} — параметры, контролирующие начальный наклон кривой закона поврежденности материала. Геометрическая интерпретация зависимости W_t (W_c) — α_{dt} (α_{dc}) приведена на рис. 10.

$$d\alpha_{dt} = (1 - \alpha_c) \cdot d\lambda \cdot \|\mathbf{m}(k_p, \boldsymbol{\sigma})\| / x_s(p); \quad (54)$$

$$d\alpha_{dc} = \alpha_c \cdot d\lambda \cdot \|\mathbf{m}(k_p, \boldsymbol{\sigma})\| / x_s(p), \quad k_p \geq 1, \quad (55)$$

где α_c — скалярный безразмерный коэффициент, обеспечивающий переход между режимами сжатия и растяжения (56); $x_s(p)$ — коэффициент хрупкости при разупрочнении, отражающий зависимость разупрочнения бетона от степени гидростатического

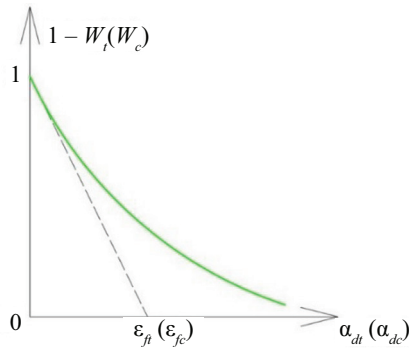


Рис. 10. Эволюция параметров поврежденности $W_i(W_c)$ в зависимости от функций $\alpha_{dt}(\alpha_{dc})$

Fig. 10. Evolution of damage parameters $W_i(W_c)$ depending on functions $\alpha_{dt}(\alpha_{dc})$

обжатия. Коэффициент $x_s(p)$ может быть получен с помощью формул (57) и (58):

$$\alpha_c = \sum_{i=1}^3 (\bar{\sigma}_{ci} \cdot (\bar{\sigma}_{ci} + \bar{\sigma}_{ti}) / \|\bar{\sigma}\|^2); \quad (56)$$

$$x_s(p) = 1 + (A_s - 1) \cdot R_s(p)^3; \quad (57)$$

$$R_s(p) = \begin{cases} -\frac{p \cdot \sqrt{2}}{q}, & p \leq 0; \\ 0, & p > 0, \end{cases} \quad (58)$$

где A_s — безразмерный скалярный параметр, отвечающий за скорость изменения коэффициента хрупкости при разупрочнении в зависимости от гидростатического инварианта p . Значение параметра должно подбираться на основании трехосных испытаний бетона. В случае отсутствия опытных данных значение может быть принято равным 20.

Процесс разупрочнения бетона при растяжении сопровождается локализацией необратимых деформаций на участках сравнительно малого размера. Локализация необратимых деформаций, возникающая в околонулевом объеме в рамках конечно-элементного решения, ведет к патологической чувствительности результатов решения к размеру конечно-элементной сетки, а также возникновению тенденции к ухудшению сходимости с уменьшением размера КЭ [33, 34]. С математической точки зрения подобное явление вызвано локальной потерей эллиптичности дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих стационарные процессы [35]. Для решения проблемы локализации в данной работе был использован метод регуляризации, основанный на теории полосы трещин (crack band theory) [36]. Основная идея подхода заключается в том, что параметр ϵ_{ft} , контролирующий разупрочнение при растяжении, является функцией от характерного размера элемента l_{char} . Значение l_{char} равно размеру КЭ в плоскости, перпендикулярной направлению образования трещины (вычисляется индивидуально для каждого КЭ). Геометрическая интерпретация параметра l_{char} изображена на рис. 11.

Таким образом, значение параметра ϵ_{ft} может быть найдено по формуле:

$$\epsilon_{ft} = \frac{G_F}{R_{bt} \cdot l_{char}}, \quad (59)$$

где G_F — энергия разрушения (энергия, требующаяся для полного разрыва межатомных связей на единичной площади поверхности трещины). Величина энергии разрушения может быть найдена по формуле (60) согласно исследованию [20]. В формуле может быть использовано значение призмной прочности вместо цилиндрической, так как разница в величине энергии разрушения пренебрежимо мала. Концепция применения подобного способа регуляризации в рамках модели бетона ранее рассматривалась в работе [37]. Несмотря на то, что этот способ уступает в эффективности регуляризации нелокальным подходам, он является наиболее простым с точки зрения математики:

$$G_F = 74 \cdot R_b^{0,18} [\text{МПа}], \text{ Н/мм}. \quad (60)$$

Значение параметра ϵ_{fc} должно устанавливаться на основании опытных данных либо эталонных диаграмм, представленных в нормативных документах. В условии отсутствия сведений параметры могут быть приняты равными 0,001.

Таким образом, для использования модели необходимо 14 параметров, которые можно разделить на четыре группы:

- две упругие константы: модуль упругости E_b , коэффициент Пуассона ν ;
- пять параметров поверхности нагружения: пределы прочности на одноосное сжатие R_b , одноосное растяжение R_{bt} и двухосное равномерное сжатие R_{2b} , координата пересечения шатра сжатия с гидростатической осью X и множитель, определяющий начало шатра сжатия R_{vh} ;
- четыре параметра упрочнения A_h, B_h, C_h, D_h ;
- три параметра повреждения: энергия разрушения G_F ; модуль разупрочнения при сжатии ϵ_{fc} ; параметр, контролирующий зависимость параметра хрупкости от степени гидростатического обжатия A_s .

Значения параметров третьей и четвертой группы могут быть найдены согласно рекомендациям и формулам, представленным в тексте статьи на основании значения R_b .

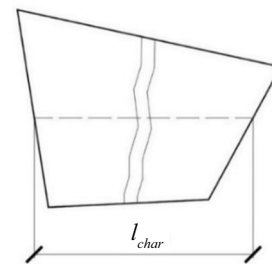


Рис. 11. Геометрическая интерпретация параметра l_{char}

Fig. 11. Geometric interpretation of the parameter l_{char}

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель материала реализована на языке FORTRAN 77 в качестве пользовательской модели USERMAT в конечно-элементном комплексе ANSYS. В настоящем разделе приведено сравнение результатов лабораторных и численных испытаний. На рис. 12–14 линиями показаны результаты численных опытов, точками — результаты, полученные в лаборатории.

В опытах И. Имрана [38] цилиндрические образцы подвергались трехосному неравномерному сжатию. Опыты выполнялись в два этапа: на первом этапе образец нагружался боковым давлением, на втором этапе происходило осевое нагружение образца при постоянной величине бокового давления. Бетон образцов имел следующие характеристики: $E_b = 30\,000$ МПа, $\nu = 0,15$, $R_b = 47,4$ МПа, $R_{bt} = 4,74$ МПа. Сравнение результатов представлено на рис. 12, рядом с результатами каждого опыта указаны главные напряжения бокового давления.

В опытах Х. Купфера [39] на бетонных образцах-пластинах воссоздавалась работа материала при плоском напряженном состоянии. Образцы разных серий испытывались при различных соотноше-

ниях главных напряжений. Бетон образцов имел следующие характеристики: $E_b = 32\,000$ МПа, $\nu = 0,18$, $R_b = 32,8$ МПа, $R_{bt} = 3,3$ МПа. Сравнение результатов лабораторных и численных испытаний приведено на рис. 13 (рядом с результатами каждого опыта указано соотношение ненулевых главных напряжений).

В опытах, проведенных Ф.К. Канером [40], цилиндрические образцы подвергались трехосному сжатию. Бетон образцов имел следующие характеристики: $E_b = 25\,000$ МПа, $\nu = 0,2$, $R_b = 45,7$ МПа, $R_{bt} = 4,57$ МПа. Было выполнено две серии опытов. В первой серии опытов испытание образцов происходило в два этапа: на первом этапе образцы нагружались трехосным равномерным сжатием, на втором этапе при постоянном боковом давлении происходило осевое деформирование цилиндра. Образцы разных серий испытывались при различных значениях предварительного трехосного обжатия. Во второй серии опытов образцы подвергались трехосному равномерному сжатию. Сравнение результатов лабораторных и численных испытаний для обеих серий показано на рис. 14.

В серии опытов, описанных в работе [41], образцы подвергались циклическому одноосному растяжению. Бетон образцов имел следующие характе-

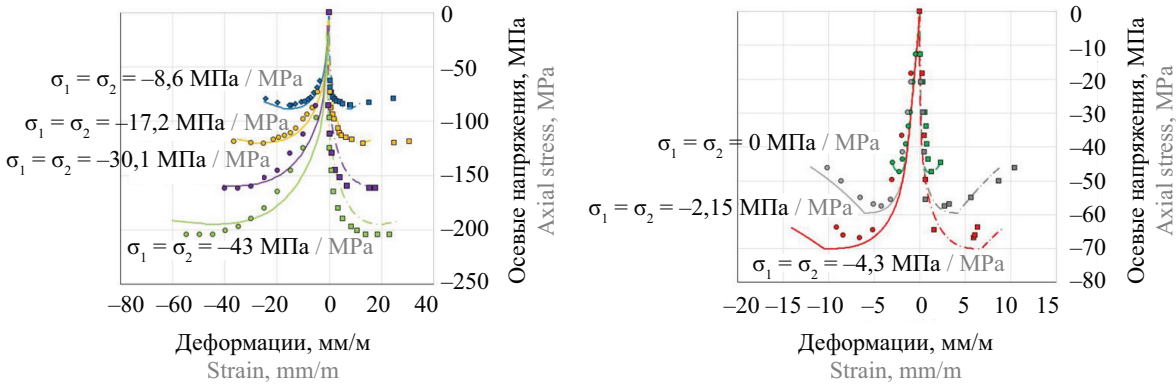


Рис. 12. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, выполненных И. Имраном
Fig. 12. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by I. Imran

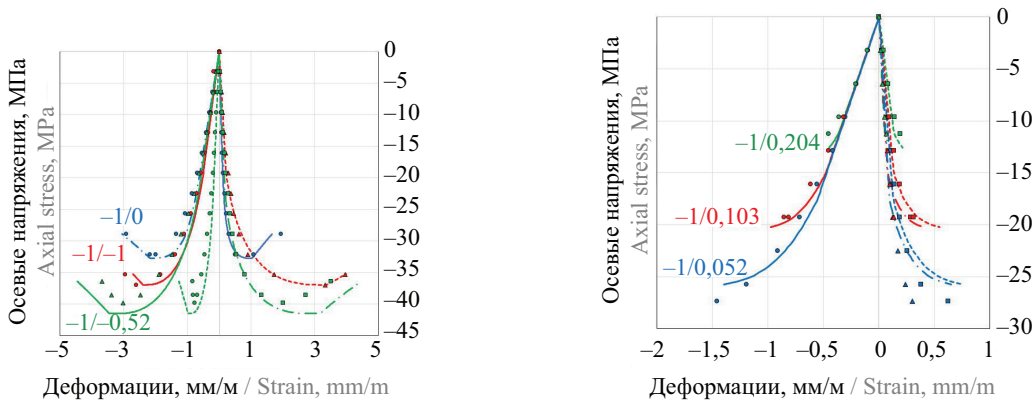


Рис. 13. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, выполненных Х. Купфером
Fig. 13. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by H. Kupfer

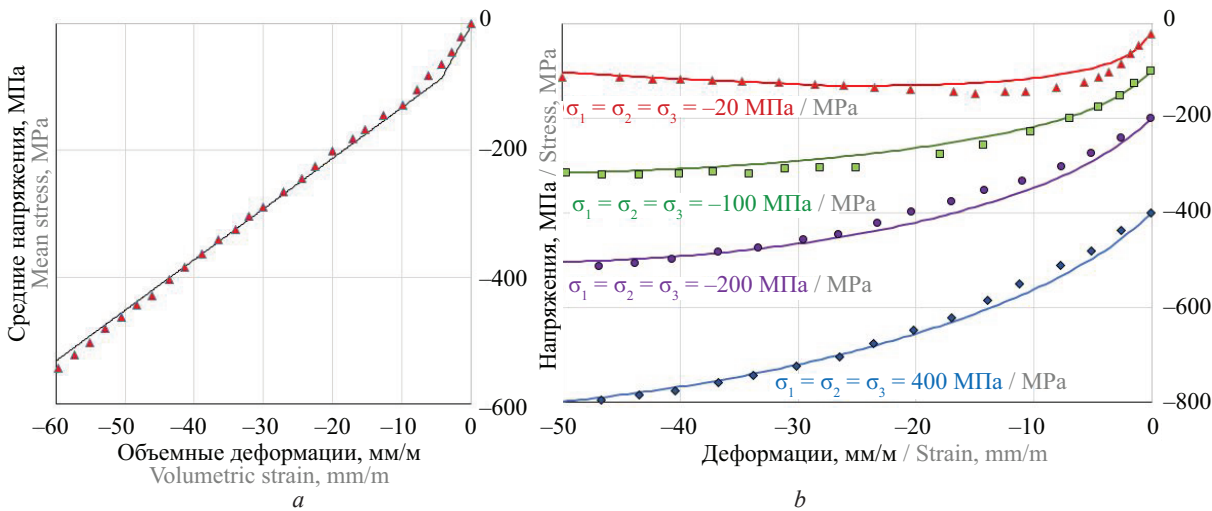


Рис. 14. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний, выполненных Ф.К. Канером: *a* — результаты для образцов первой серии испытаний; *b* — для второй

Fig. 14. Comparison of the numerical model response and laboratory results made by F.C. Caner: *a* — first test series are shown; *b* — second test series are shown

ристики: $E_b = 28\,000$ МПа, $\nu = 0,2$, $R_b = 40$ МПа, $R_{bt} = 3,5$ МПа, $G_F = 55$ Н/м. В рамках опытов, выполненных И.Д. Карсаном [42], бетонные образцы подвергались циклическому одноосному сжатию. Бетон образцов имел следующие характеристики: $E_b = 30\,000$ МПа, $\nu = 0,2$, $R_b = 28$ МПа, $R_{bt} = 2,8$ МПа, $A_s = 25$, $\epsilon_{fc} = 0,001$. Сравнение результатов лабораторных и численных испытаний для обеих серий представлено на рис. 15 (пунктирной линией показаны результаты лабораторного испытания).

Результаты лабораторных испытаний узлов сопряжения плитных и вертикальных конструкций без поперечного армирования приведены в статье [43]. В рамках данной работы выполнено численное испытание образца PG-6, имеющего следующие характеристики: $E_b = 28\,700$ МПа, $\nu = 0,2$, $R_b = 34,7$ МПа, $R_{bt} = 2,4$ МПа.

Рабочая высота плиты составляет 96 мм. Армирование растянутой зоны представлено арматурными стержнями диаметром 14 мм, расположенными с шагом 110 мм и имеющими предел текучести 526 МПа. Армирование сжатой зоны отсутствует. Геометрия образца PG-6 и конечно-элементная сетка численной модели показаны на рис. 16.

Сравнение кривых нагрузка–перемещения, численного и лабораторного образцов представлено на рис. 17 (пунктирной линией показаны результаты лабораторного испытания; рядом с каждой кривой указано значение предельной нагрузки).

На рис. 18 приведено сравнение картины трещинообразования лабораторного образца и первые главные пластические деформации численного.

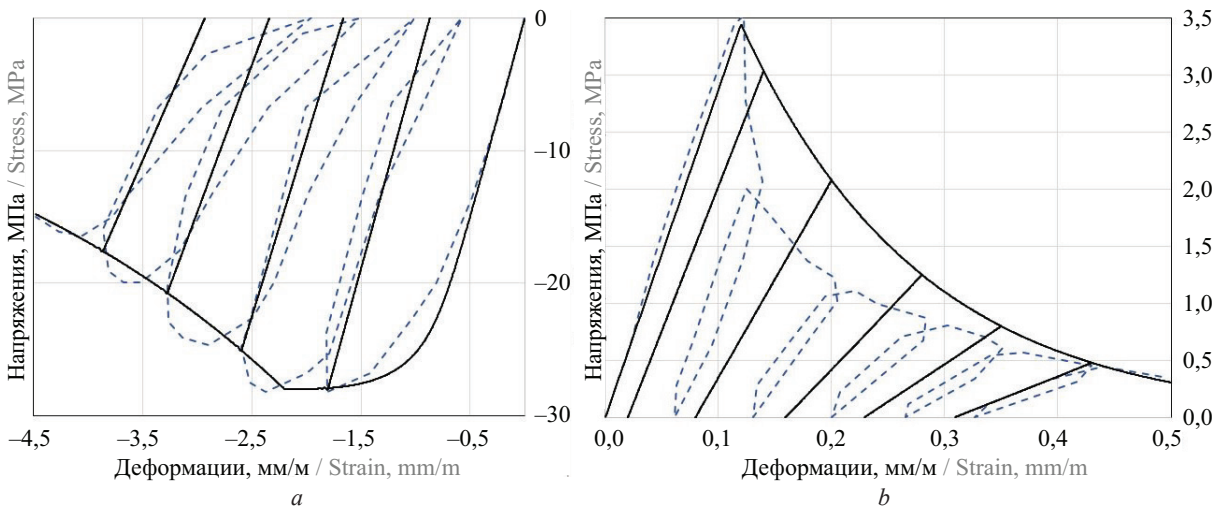


Рис. 15. Сравнение результатов численных и лабораторных испытаний для образцов, подвергавшихся циклическому нагружению: *a* — результаты испытания образцов, подвергавшихся сжатию; *b* — растяжению

Fig. 15. Comparison of numerical and laboratory test results for specimens subjected to cyclic loading: *a* — results of the compression test series are shown; *b* — results of the tension test series are shown

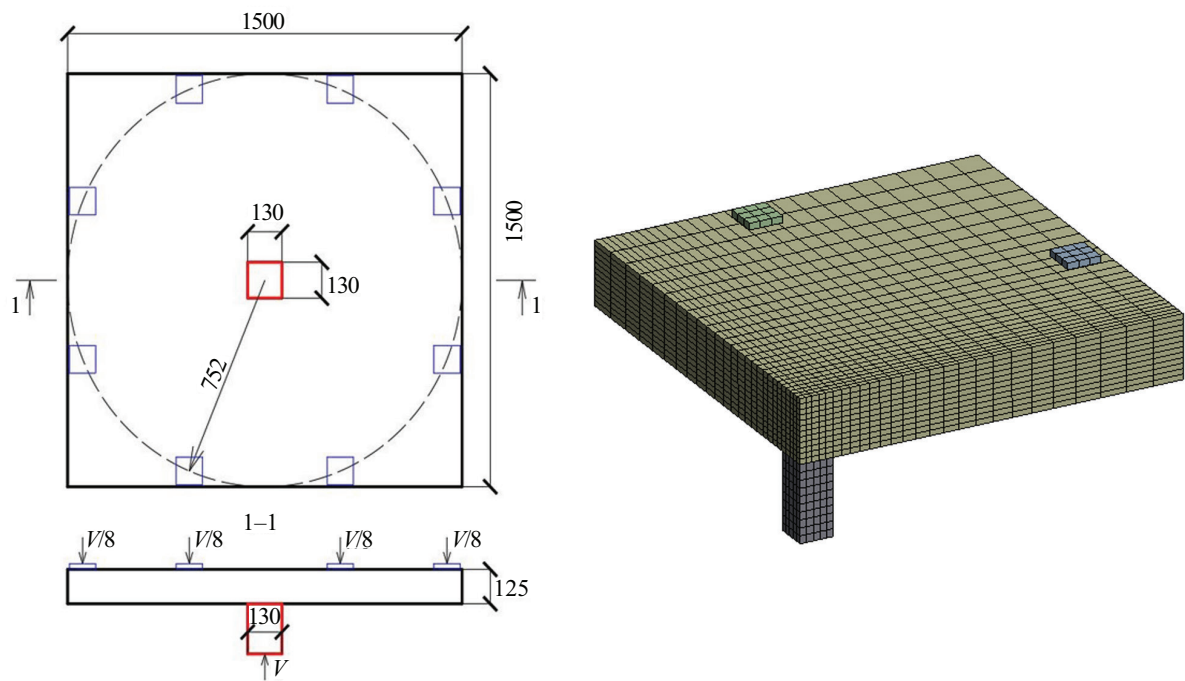


Рис. 16. Геометрия образца PG-6 (все размеры представлены в мм) и конечно-элементная сетка PG-6 (четверть)
Fig. 16. Geometry of the specimen PG-6 (all dimensions are in mm) and mesh of PG-6 (quarter)

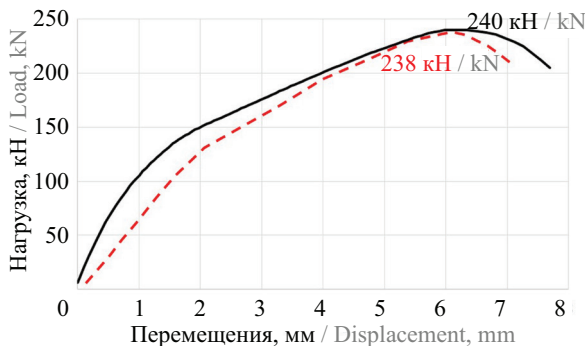


Рис. 17. Сравнение кривых нагрузка–перемещения для численного и лабораторного образцов
Fig. 17. Comparison of the load–deflection curves for the numerical and laboratory specimens

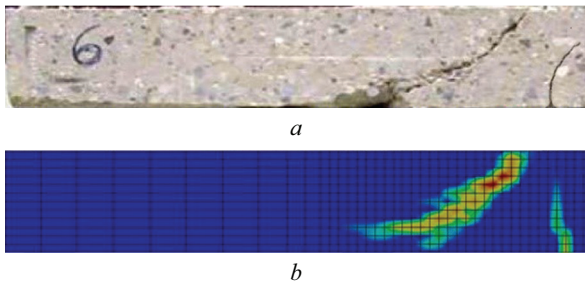


Рис. 18. Сравнение результатов: *a* — картина трещинообразования лабораторного образца PG-6; *b* — первые главные пластические деформации численной модели образца PG-6
Fig. 18. Comparison of results: *a* — crack pattern of the laboratory specimen PG-6; *b* — first principal plastic strains of the numerical specimen PG-6

Разница между предельными нагрузками лабораторного и численного образцов составила менее 1 %; разница между перемещениями, соответствующими предельным нагрузкам, — 1 %.

В отчете [44] представлены результаты испытаний шарнирно опертых бетонных балок с надрезом. Основная идея испытаний заключалась в создании искусственной зоны локализации необратимых деформаций для измерения энергии разрушения бетона. Данные опыты были включены в статью для тестирования стабильности работы материала на стадии разупрочнения при различных размерах конечно-элементной сетки. Длина балки составляет 500 мм; размер поперечного сечения — 100 × 100 мм; глубина и ширина надреза — 50 и 5,5 мм соответственно. Схема балки изображена на рис. 19.

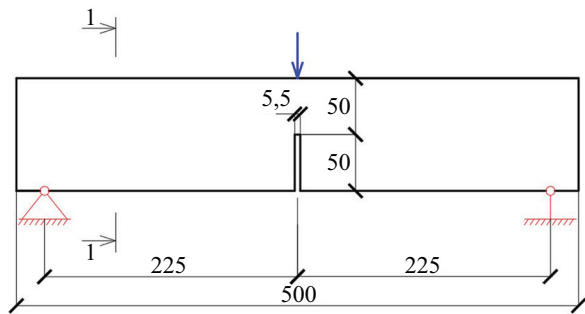


Рис. 19. Геометрическая схема балок с надрезом, использованных в испытаниях [44]
Fig. 19. Geometric diagram of the notched beams used in the tests [44]

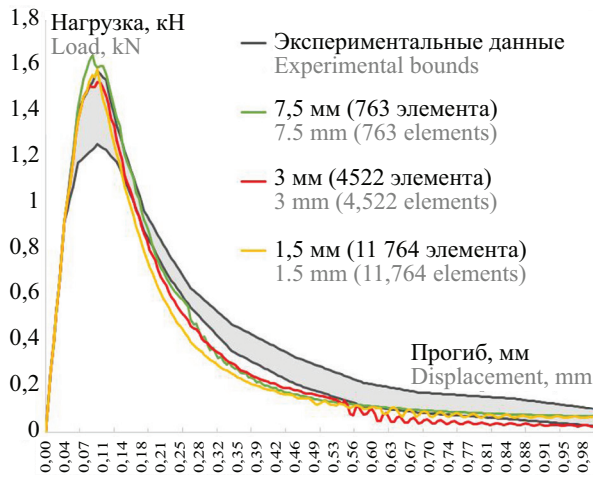


Рис. 20. Сравнение результатов лабораторных испытаний, полученных на балках-близнецах с результатами численных испытаний, полученных на образцах с разным размером конечно-элементной сетки

Fig. 20. Comparison of the laboratory test results obtained on twin beams with the results of numerical tests obtained on specimens with different mesh sizes

Бетон балок имеет следующие характеристики: $E_b = 20\,000$ МПа, $\nu = 0,2$, $R_b = 24$ МПа, $R_{bt} = 2,4$ МПа, $G_F = 100$ Н/м. Выполнено три численных испытания с разными размерами конечно-элементной сетки. Сравнение между результатами лабораторных и численных образцов показано на рис. 20. Серым цветом на графике отмечена огибающая зона, построенная на основании результатов испытаний не-

скольких балок-близнецов. Цветными линиями показаны результаты численных образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная авторами деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением и повреждением представляет собой универсальный инструмент, позволяющий моделировать поведение бетона в рамках кратковременного статического нагружения. Поверхность нагружения модели имеет единственную зону сингулярности, плавный переход между основной частью и шатром сжатия и описывает напряженное состояние бетона с достаточной точностью. Эффекты дилатации и контракции учитываются путем введения комбинированной поверхности пластического потенциала наряду с двойным независимым упрочнением. Влияние напряженного состояния на деформативность материала обеспечивается путем использования коэффициентов хрупкости. Раздельное накопление параметров поврежденности позволяет моделировать изменение жесткости при циклических и знакопеременных нагружениях. Для регуляризации проблемы локализации необратимых деформаций, ведущей к зависимости результатов от размера конечно-элементной сетки и ухудшению сходимости при уменьшении размера КЭ, в модели используется подход, основанный на теории полосы трещин (crack band theory). В статье представлены значения для всех параметров, необходимых для использования модели материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильюшин А.А. Пластичность: основы общей математической теории. М. : Изд-во АН СССР, 1963. 271 с.
2. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М. : Стройиздат, 1974. 316 с. EDN RSNPAX.
3. Лейтес Е.С. К построению теории деформирования бетона, учитывающей нисходящую ветвь диаграммы деформаций материала : сб. науч. тр. НИИЖБ, 1982. С. 24–32.
4. Яшин А.В. Теория деформирования бетона при простом и сложном нагружениях // Бетон и железобетон. 1986. № 8. С. 39–42.
5. Недорезов А.В. Деформации и прочность железобетонных элементов при сложных режимах объемного напряженного состава : дис. ... канд. техн. наук. Макеевка, 2018. 229 с.
6. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.
7. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запо-

- рожье : Издательство журнала «Світ геотехніки», 2009. 400 с.
8. Kupfer H.B., Gerstle K.H. Behavior of concrete under biaxial stresses // Journal of the Engineering Mechanics Division. 1973. Vol. 99. Issue 4. Pp. 853–866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789
9. Ottosen N.S. Constitutive model for short-time loading of concrete // Journal of the Engineering Mechanics Division. 1979. Vol. 105. Issue 1. Pp. 127–141. DOI: 10.1061/jmcea3.0002446
10. Xing Y. Constitutive equation for concrete using strain-space plasticity model : Ph.D. thesis. New Jersey, 1993.
11. Drucker D.C. Some implications of work hardening and ideal plasticity // Quarterly of Applied Mathematics. 1950. Vol. 7. Issue 4. Pp. 411–418. DOI: 10.1090/qam/34210
12. Prager W. Recent developments in the mathematical theory of plasticity // Journal of Applied Physics. 1949. Vol. 20. Issue 3. Pp. 235–241. DOI: 10.1063/1.1698348

13. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. М. : Наука, 1987. 80 с.

14. Lee J., Fenves L.G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures // Journal of Engineering Mechanics. 1998. Vol. 124. Issue 8. Pp. 892–900. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:8(892)

15. Etse G., Willam K. Fracture Energy Formulation for Inelastic Behavior of Plain Concrete // Journal of Engineering Mechanics. 1994. Vol. 120. Issue 9. Pp. 1983–2011. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1994)120:9(1983)

16. Grassl P., Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure // International Journal of Solids and Structures. 2006. Vol. 43. Issue 22–23. Pp. 7166–7196. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032

17. Grassl P., Xenos D., Nyström U., Rempling R., Gylltoft K. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete // International Journal of Solids and Structures. 2013. Vol. 50. Issue 24. Pp. 3805–3816. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008

18. Zreid I., Kaliske M. A gradient enhanced plasticity–damage microplane model for concrete // Computational Mechanics. 2018. Vol. 62. Issue 5. Pp. 1239–1257. DOI: 10.1007/s00466-018-1561-1

19. Бударин А.М., Ремпель Г.И., Камзолкин А.А., Алехин В.Н. Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 4. С. 517–532. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532

20. Menetrey P., Willam K.J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization // ACI Structural Journal. 1995. Vol. 92. Issue 3. DOI: 10.14359/1132

21. Fib model code for concrete structures 2010. 2013. DOI: 10.1002/9783433604090

22. Jiang H., Zhao H. Calibration of the continuous surface cap model for concrete // Finite Elements in Analysis and Design. 2015. Vol. 97. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002

23. Smith S.H. On fundamental aspects of concrete behavior : master's thesis. Boulder, University of Colorado at Boulder, 1985.

24. Соловьев Л.Ю. Нелинейная модель бетона на основе теории пластического течения // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 131–140. EDN TFBEMN.

25. Yang B.L., Dafalias J.F., Herrmann L.R. A bounding surface plasticity model for concrete // Journal of Engineering Mechanics. 1985. Vol. 111. Issue 3. Pp. 359–380. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1985)111:3(359)

26. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. : Госстройиздат, 1962. 98 с.

27. Истомин А.Д., Беликов Н.А. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряженного состояния // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 159–162. EDN OUVYTL.

28. Семенов А.С. Вычислительные методы в теории пластичности : учебное пособие. СПб. : Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 210 с. EDN QJUTBT.

29. Samani A.K., Attard M.M. Lateral strain model for concrete under compression // ACI Structural Journal. 2014. Vol. 111. Issue 2. DOI: 10.14359/51686532

30. Bažant Z.P., Bishop F.C., Chang T. Confined compression tests of cement paste and concrete up to 300 ksi // ACI Journal Proceedings. 1986. Vol. 83. Issue 4. DOI: 10.14359/10448

31. Fossum A.F., Fredrich J.T. Cap plasticity models and compactive and dilatant pre-failure deformation // 4th North American Rock Mechanics Symposium. Seattle, Washington, 2000. Pp. 1169–1176.

32. Azadi Kakavand M.R., Taciroglu E. An enhanced damage plasticity model for predicting the cyclic behavior of plain concrete under multiaxial loading conditions // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2020. Vol. 14. Issue 6. Pp. 1531–1544. DOI: 10.1007/s11709-020-0675-7

33. Bažant Z., Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. Boca Raton : C.R.C., 1998. DOI: 10.1201/9780203756799

34. Jirásek M., Bauer M. Numerical aspects of the crack band approach // Computers & Structures. 2012. Vol. 110–111. Pp. 60–78. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.06.006

35. Galavi V., Schweiger H.F. Nonlocal multilaminate model for strain softening analysis // International Journal of Geomechanics. 2010. Vol. 10. Issue 1. Pp. 30–44. DOI: 10.1061/(asce)1532-3641(2010)10:1(30)

36. Bažant Z.P., Oh B.H. Crack band theory for fracture of concrete // Matériaux et Constructions. 1983. Vol. 16. Issue 3. Pp. 155–177. DOI: 10.1007/bf02486267

37. Červenka J., Červenka V., Laserna S. On crack band model in finite element analysis of concrete fracture in engineering practice // Engineering Fracture Mechanics. 2018. Vol. 197. Pp. 27–47. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.04.010

38. Imran I., Pantazopoulou S.J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress // ACI Materials Journal. 1996. Vol. 93. Issue 6. DOI: 10.14359/9865

39. Kupfer H.B., Gerstle K.H. Behavior of concrete under biaxial stresses // Journal of the Engineering Mechanics Division. 1973. Vol. 99. Issue 4. Pp. 853–866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789

40. Caner F.C., Bažant Z.P. Microplane model M4 for concrete. II: Algorithm and calibration // Journal of Engineering Mechanics. 2000. Vol. 126. Issue 9. Pp. 954–961. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2000)126:9(954)

41. Gopalaratnam V.S., Shah S.P. Softening response of plain concrete in direct tension // ACI Journal Proceedings. 1985. Vol. 82. Issue 3. DOI: 10.14359/10338

42. Karsan I.D., Jirsa J.O. Behavior of concrete under compressive loadings // Journal of the Structural Division. 1969. Vol. 95. Issue 12. Pp. 2543–2564. DOI:

10.1061/jsdeag.0002424

43. Guandalini S. Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé : Ph.D. Thesis. Lausanne, 2006. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3380

44. Kormeling H.A., Reinhardt H.W. Determination of the fracture energy of normal concrete and epoxy modified concrete. Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Report No. 5-83-18, 1983.

Поступила в редакцию 13 июля 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 2 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Михайлович Бударин — главный специалист отдела расчетных обоснований; **Институт Гидропроект**; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; alex.budarin01@gmail.com;

Георгий Игоревич Ремпель — главный эксперт отдела расчетных обоснований; **Институт Гидропроект**; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; g.rempel@hydroproject.ru;

Алексей Александрович Камзолкин — ведущий инженер; **Научно-исследовательский центр «СтаДиО» (НИЦ «СтаДиО»);** 125124, г. Москва, 3-я ул. Ямского Поля, д. 18; holinmail@mail.ru;

Владимир Николаевич Алехин — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования объектов строительства; **Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ);** 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; РИНЦ ID: 549888, Scopus: 7004307891, ResearcherID: B-4747-2016, ORCID: 0000-0001-8291-6052; v.n.alekhin@urfu.ru.

Вклад авторов:

Бударин А.М. — концепция исследования, сбор материала и обработка данных, реализация модели в конечно-элементном комплексе, научное редактирование, научное руководство.

Ремпель Г.И. — методология исследования, реализация модели в конечно-элементном комплексе, научное редактирование.

Камзолкин А.А. — методология исследования, реализация модели в конечно-элементном комплексе, научное редактирование.

Алехин В.Н. — научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Il'yushin A.A. *Plasticity: fundamentals of general mathematical theory*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publishing House, 1963; 271. (rus.).

2. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. *Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 316. EDN RSNPAX. (rus.).

3. Leites E.S. *To construct a theory of concrete deformation that takes into account the descending branch of the deformation diagram of the material : collection of scientific papers*. Moscow, NIIZhB, 1982; 24-32. (rus.).

4. Yashin A.V. Theory of concrete deformation under simple and complex loads. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1986; 8:39-42. (rus.).

5. Nedorezov A.V. *Strain and strength of reinforced concrete elements in complex modes of triaxial stress composition : dis. ... cand. tech. sci.* Makeevka, 2018. (rus.).

6. Karpenko N.I. *General Models of the Reinforced Concrete Mechanics*. Moscow, Stroyizdat, 1996; 416. (rus.).

7. Klovanih S.F. *Finite element method in non-linear problems of engineering mechanics*. Zaporozhye, Publishing house of the magazine "Svit Geotekhniki", 2009; 400. (rus.).

8. Kupfer H.B., Gerstle K.H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1973; 99(4):853-866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789

9. Ottosen N.S. Constitutive model for short-time loading of concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1979; 105(1):127-141. DOI: 10.1061/jmcea3.0002446

10. Xing Y. *Constitutive equation for concrete using strain-space plasticity model : Ph.D. Thesis*. New Jersey, 1993.

11. Drucker D.C. Some implications of work hardening and ideal plasticity. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1950; 7(4):411-418. DOI: 10.1090/qam/34210

12. Prager W. Recent developments in the mathematical theory of plasticity. *Journal of Applied Physics*. 1949; 20(3):235-241. DOI: 10.1063/1.1698348.

13. Rabotnov Yu.N. *Introduction to fracture mechanics*. Moscow, Nauka, 1987; 80. (rus.).

14. Lee J., Fenves L.G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*. 1998; 124(8):892-900. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:8(892)

15. Etse G., Willam K. Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete. *Journal*

of *Engineering Mechanics*. 1994; 120(9):1983-2011. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1994)120:9(1983)

16. Grassl P., Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure. *International Journal of Solids and Structures*. 2006; 43(22-23):7166-7196. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032

17. Grassl P., Xenos D., Nyström U., Rempling R., Gylltoft K. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*. 2013; 50(24):3805-3816. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008

18. Zreid I., Kaliske M. A gradient enhanced plasticity–damage microplane model for concrete. *Computational Mechanics*. 2018; 62(5):1239-1257. DOI: 10.1007/s00466-018-1561-1

19. Budarin A.M., Rempel G.I., Kamzolkyn A.A., Alekhin V.N. Stress-strain concrete model with double independent reinforcement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(4):517-532. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532 (rus.).

20. Menetrey P., Willam K.J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995; 92(3). DOI: 10.14359/1132

21. *Fib model code for concrete structures 2010*. 2013. DOI: 10.1002/9783433604090

22. Jiang H., Zhao H. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015; 97:1-19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002

23. Smith S.H. *On fundamental aspects of concrete behavior : masters's thesis*. Boulder, University of Colorado at Boulder, 1985.

24. Soloviev L.Yu. Non-linear concrete model based on the plastic flow theory. *Systems. Methods. Technologies*. 2014; 4(24):131-140. EDN TFBEMN. (rus.).

25. Yang B.L., Dafalias J.F., Herrmann L.R. A bounding surface plasticity model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 1985; 111(3):359-380. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1985)111:3(359)

26. Berg O.Ya. *Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Gosstroyizdat, 1962; 98. (rus.).

27. Istomin A.D., Belikov N.A. Dependence of the borders of the microcreeping in concrete from strengs and strain condition. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 2-1:159-162. EDN OUVYTL. (rus.).

28. Semenov A.S. *Computational methods in theory of plasticity : textbook*. St. Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2008; 210. EDN QJUTBT. (rus.).

29. Samani A.K., Attard M.M. Lateral strain model for concrete under compression. *ACI Structural Journal*. 2014; 111(2). DOI: 10.14359/51686532.

30. Bažant Z.P., Bishop F.C., Chang T. Confined compression tests of cement paste and concrete up to

300 ksi. *ACI Journal Proceedings*. 1986; 83(4). DOI: 10.14359/10448

31. Fossum A.F., Fredrich J.T. Cap plasticity models and compactive and dilatant pre-failure deformation. *4th North American Rock Mechanics Symposium*. Seattle, Washington, 2000; 1169-1176.

32. Azadi Kakavand M.R., Taciroglu E. An enhanced damage plasticity model for predicting the cyclic behavior of plain concrete under multiaxial loading conditions. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2020; 14(6):1531-1544. DOI: 10.1007/s11709-020-0675-7

33. Bažant Z., Planas J. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. Boca Raton, C.R.C., 1998. DOI: 10.1201/9780203756799

34. Jirásek M., Bauer M. Numerical aspects of the crack band approach. *Computers & Structures*. 2012; 110-111:60-78. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.06.006

35. Galavi V., Schweiger H.F. Nonlocal multilaminate model for strain softening analysis. *International Journal of Geomechanics*. 2010; 10(1):30-44. DOI: 10.1061/(asce)1532-3641(2010)10:1(30)

36. Bažant Z.P., Oh B.H. Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions*. 1983; 16(3):155-177. DOI: 10.1007/bf02486267

37. Červenka J., Červenka V., Laserna S. On crack band model in finite element analysis of concrete fracture in engineering practice. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018; 197:27-47. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.04.010

38. Imran I., Pantazopoulou S.J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress. *ACI Materials Journal*. 1996; 93(6). DOI: 10.14359/9865

39. Kupfer H.B., Gerstle K.H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1973; 99(4):853-866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789

40. Caner F.C., Bažant Z.P. Microplane model M4 for concrete. II: Algorithm and calibration. *Journal of Engineering Mechanics*. 2000; 126(9):954-961. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2000)126:9(954)

41. Gopalaratnam V.S., Shah S.P. Softening response of plain concrete in direct tension. *ACI Journal Proceedings*. 1985; 82(3). DOI: 10.14359/10338

42. Karsan I.D., Jirsa J.O. Behavior of concrete under compressive loadings. *Journal of the Structural Division*. 1969; 95(12):2543-2564. DOI: 10.1061/js-deag.0002424

43. Guandalini S. *Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé : Ph.D. Thesis*. Lausanne, 2006. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3380

44. Kormeling H.A., Reinhardt H.W. *Determination of the fracture energy of normal concrete and epoxy modified concrete*. Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Report No. 5-83-18, 1983.

Received July 13, 2023.

Adopted in revised form on September 20, 2023.

Approved for publication on February 2, 2024.

B I O N O T E S: **Alexander M. Budarin** — chief specialist of the Structural analysis department; **JSC Institute Hydroproject**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; alex.budarin01@gmail.com;

Georgy I. Rempel — chief expert of the Structural analysis department; **JSC Institute Hydroproject**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; g.rempel@hydroproject.ru;

Alexey A. Kamzolkin — lead engineer; **JSC NRC “Stadyo” (SRC “StaDiO”)**; 18 3rd Yamskogo Polya st., Moscow, 125124, Russian Federation; holinmail@mail.ru;

Vladimir N. Alekhin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer-Aided Design Systems for Construction Projects; **Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; ID RSCI: 549888, Scopus: 7004307891, ResearcherID: B-4747-2016, ORCID: 0000-0001-8291-6052; v.n.alekhin@urfu.ru.

Contribution of the authors:

Alexander M. Budarin — research concept, data gathering and processing, implementation in finite-element software package, scientific editing of the text, scientific management.

Georgy I. Rempel — research methodology, implementation in finite-element software package, scientific editing of the text.

Alexey A. Kamzolkin — research methodology, implementation in finite-element software package, scientific editing of the text.

Vladimir N. Alekhin — scientific editing of the text.

The authors declare no conflicts of interests.

Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций

Григорий Иванович Белый, Егор Андреевич Матвеев

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Дефекты и повреждения стальных конструкций в сочетании с коррозией металла, стимулирующей к тому же потерю местной устойчивости, могут приводить к ограниченно работоспособному их состоянию или эксплуатационной непригодности. Метод расчета элементов с такими повреждениями отсутствует. При этом «нормативная» проверка прочности неповрежденных элементов при двух или более параметрических загрузках ведет к заниженным результатам. Поэтому актуальна разработка достоверного метода расчета на прочность элементов, в том числе неповрежденных, при общем нагружении.

Материалы и методы. Предложен метод исследования прочности поврежденных и неповрежденных элементов стальных конструкций при общем случае нагружения с учетом взаимного влияния усилий по фактическому предельному состоянию, соответствующему критерию ограниченной пластической деформации $\epsilon_{lim,p} = \epsilon_{lim,p} E / R_y$. Решение задачи проводится в безразмерных параметрах в обратной последовательности, что дает возможность сократить время расчета на несколько порядков.

Результаты. На основании анализа полученных результатов исследования разработан эффективный практический метод расчета поврежденных и неповрежденных элементов, позволяющий получить более достоверные сведения об их прочности. Установлено влияние повреждения на прочность, которое в зависимости от места его расположения относительно действующих усилий N , M_x , M_y может привести к работоспособному, ограниченно или неработоспособному состояниям. Выявлены существенные резервы прочности неповрежденных двутавровых элементов.

Выводы. Предложено аналитическое решение, в котором ослабления сечения компенсируются эквивалентным догружением фиктивными силами, позволяющими свести проверку прочности как для неповрежденного элемента. Обнаруженные резервы прочности неповрежденных двутавровых элементов указывают на необходимость исследования стреловой с другими типами сечений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: повреждения, редукция сечения, предельные состояния, прочность, общее нагружение, предельная пластическая деформация, алгоритм «сечение»

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белый Г.И., Матвеев Е.А. Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 544–556. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.544-556

Автор, ответственный за переписку: Егор Андреевич Матвеев, egormatveev7798@gmail.com.

Calculation method improvement of damaged elements of steel structures

Grigory I. Belyy, Egor A. Matveev

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint-Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Defects and damages of steel structures in combination with metal corrosion, stimulating the loss of local stability, can lead to their limited serviceable condition or operational unsuitability. There is no method for calculating elements with such damages. At the same time, “normative” strength testing of undamaged elements under two or more parametric loading leads to underestimated results. Therefore, the development of a reliable method for calculating the strength of elements, including undamaged ones, under general loading is relevant.

Materials and methods. A method for investigating the strength of damaged and undamaged elements of steel structures in the general case of loading, taking into account the mutual influence of forces on the actual limit state corresponding to the criterion of limited plastic deformation $\epsilon_{lim,p} = \epsilon_{lim,p} E / R_y$ is proposed. The solution of the problem is carried out in dimensionless parameters in reverse order, which reduces the calculation time by several orders of magnitude.

Results. Based on the analysis of the obtained research results, an effective practical method for calculating damaged and undamaged elements is developed, which allows obtaining more reliable information about their strength. The effect of damage on strength was established, which, depending on its location relative to the acting forces N , M_x , M_y , can lead serviceable, limited or inoperable states. Significant strength reserves of undamaged I-beam elements were identified.

Conclusions. An analytical solution in which the weakening of the cross section is compensated by equivalent loading by fictitious forces, allowing to reduce the strength test as for an undamaged element. The discovered strength reserves of undamaged I-beam elements indicate the need to study the rods with other types of cross sections.

KEYWORDS: damages, reduction of cross-section, limit states, strength, total loading, limiting plastic deformation, algorithm "cross-section"

FORCITATION: Belyy G.I., Matveev E.A. Calculation method improvement of damaged elements of steel structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):544-556. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.544-556 (rus.).

Corresponding author: Egor A. Matveev, egormatveev7798@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция и техническое перевооружение действующих предприятий, широко проводимые в настоящее время, требуют выполнения достоверной оценки технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений. Стальные конструкции достаточно чувствительны к дефектам и повреждениям, приобретенным в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации, которые в сочетании с возможной коррозией металла [1–3] значительно ускоряют физический износ, приводя их к ограниченно работоспособному состоянию или эксплуатационной непригодности.

Для оперативного принятия решений в этих случаях необходимо иметь такой быстродействующий метод расчета, который позволил бы обоснованно и достоверно выявлять фрагменты конструкций и (или) их элементы, нуждающиеся в немедленном усилении, и элементы с потенциально опасными дефектами и повреждениями.

Применение аналитически-численного метода [4] при рассмотрении предельных состояний элементов несущих конструкций покрытий из спаренных уголков, имеющих пространственные искривления оси и местные повреждения [5–9], позволило разработать практические рекомендации по их расчету, которые были изложены в Пособии по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23–81*)¹.

Полученные в трудах [6–13] результаты исследования не позволяют разработать подобные рекомендации на другие типы поврежденных элементов.

Учитывая изложенное, в настоящей статье изучение прочности проводится с использованием обратного метода [14], хорошо апробированного на исследованиях прочности и устойчивости неповрежденных элементов конструкций [15–18], а также их запредельных состояний [19]. Результаты исследования применяются при разработке инженерного метода расчета поврежденных и неповрежденных элементов с выявлением существенных резервов прочности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — элементы стальных конструкций, имеющие механические в виде мест-

ных погнутостей составляющих стержень пластинок; коррозионные, приводящие к утонению этих пластинок, с последующей потерей их устойчивости [20, 21], повреждения; а также ослабления сечения (вырезы, вырывы, истирания и др.). С целью унификации решения два первых повреждения сводятся к одному — третьему: эквивалентному вырезу (редукции сечения).

Остановимся на втором виде повреждений и рассмотрим модель неограниченно упругого стержневого элемента в двутавровом, как наиболее распространенном, сечении, в котором действуют предельные, соответствующие критерию ограниченной пластической деформации $\varepsilon_{\text{lim},p} = 3(\varepsilon_{\text{max}} = 4)$, «упругие» усилия: продольная сила N^* и изгибающие моменты M_x^* , M_y^* (рис. 1, а). При этом результатом коррозионного повреждения стало уменьшение толщины поясов и стенки до t_f^* и t_w^* , приводящие соответственно к увеличению условных гибкостей $\bar{\lambda}_f$ и $\bar{\lambda}_w$, которые могут значительно превышать допустимые (см. табл. 21 СП 294.1325800.2017)² их значения $[\bar{\lambda}_f]$ и $[\bar{\lambda}_w]$.

Следовательно, при $\bar{\lambda}_f^* > [\bar{\lambda}_f]$, $\bar{\lambda}_w^* > [\bar{\lambda}_w]$ теряют устойчивость сжатый пояс и стенка (рис. 1, б). Наиболее нагруженная сжатая часть ширины любой пластинки, выходящая за рамки определяемой предельной ее гибкостью, является нерабочей и считается ослаблением (рис. 1, с). Это позволяет выполнить переход от критического состояния пластинок к их ослаблениям. Методика определения мест ослабления и редуцированных сечений в целом хорошо изложена в работе [19] при исследовании запредельных напряженно-деформационных состояний.

Решение задачи прочности проводится в обратной последовательности в безразмерных параметрах, для чего за общий параметр загрузки принят коэффициент продольной силы $\varphi^* = N^*/R_y A$, тогда предельное условное деформированное $\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varepsilon^*(\bar{x}, \bar{y}) E/R_y$ и относительно напряженное состояние $\bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \sigma^*(\bar{x}, \bar{y}) E/R_y$ при неограниченной упругости получают один вид:

$$\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (1)$$

где $\bar{x} = x/x_*$; $\bar{y} = y/y_*$; $\varphi^* = 4(1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x})^{-1}$;

¹ Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23–81*). М.: Стройиздат, 1989. 159 с.

² СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования (с Изменениями № 1, 2). М.: Стандартинформ, 2017.

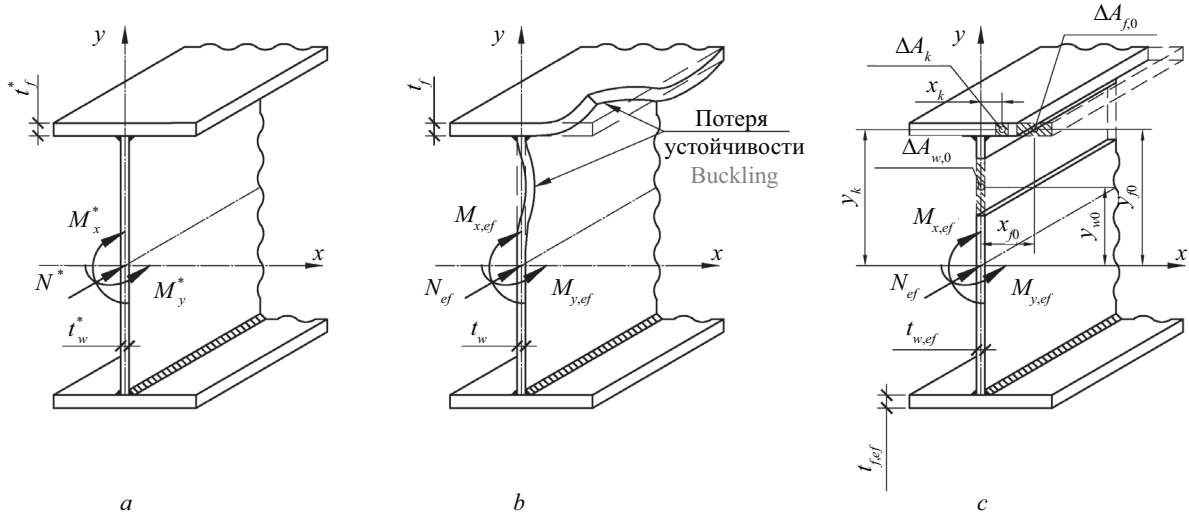


Рис. 1. Схема действующих усилий в поврежденном элементе: а — в нередуцированном сечении; б — при потере местной устойчивости; с — в эквивалентном редуцированном сечении

Fig. 1. The scheme of the acting forces in the damaged element: a — in the non-reduced section; b — with loss of local stability; c — in the equivalent reduced section

$$\begin{aligned} m_x^* &= e_y^* / \rho_x; m_y^* = e_x^* / \rho_y; \\ e_y^* &= M_x^* / N^*; e_x^* = M_y^* / N^*, \end{aligned}$$

где $\rho_x = W_{x,c} / A$; $\rho_y = W_{y,c} / A$; $W_{x,c}$, $W_{y,c}$ — моменты сопротивления наиболее напряженного волокна, имеющего координаты x^* , y^* .

Для определения соответствующего (1) фактического предельного состояния за пределом упругости с учетом ослабления в полке площадь A_{of} и стенки A_{ow} разобьем фактически ослабленное сечение на n и ослабления на n_o достаточно малых дискретных площадок ΔA_k и ΔA_{ko} с координатами центра тяжести x_k , y_k и x_{ko} , y_{ko} соответственно (рис. 1, c).

В решении поставленной задачи используем унифицированную диаграмму работы стали с физическим пределом текучести $\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}$ (рис. 2), с учетом которой гипотеза плоских сечений примет вид:

$$\bar{\epsilon}_k = \bar{\epsilon}_0 - \bar{v}'' \cdot \tilde{y}_k - \bar{u}'' \cdot \tilde{x}_k; \quad (2)$$

где $\bar{\epsilon}_0 = \epsilon_0 E / R_y$; $\bar{v}'' = v'' \rho_x E / R_y$; $\bar{u}'' = u'' \rho_y E / R_y$; $\tilde{x}_k = x_k / \rho_y$; $\tilde{y}_k = y_k / \rho_x$; ϵ_0 — относительная деформация

оси стержня с неослабленным сечением; v'' , u'' — кривизны при изгибе стержня относительно осей x и y соответственно.

Сопоставляя выражения (1) и (2) в предельном состоянии $\bar{\epsilon}_{lim} = 4$, можно увидеть:

$$\bar{\epsilon}_0 = \varphi^*; \bar{v}'' = -\varphi^* m_x^* \frac{\rho_x}{y_*}; \bar{u}'' = -\varphi^* m_y^* \frac{\rho_y}{x_*}. \quad (3)$$

Тогда, используя формулу (2) и алгоритм «сечение» [15], предельные параметры усилий, соответствующих заданному деформационному состоянию (1), примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{ef} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c \right) \\ m_{x,ef} &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{ef}} \left(-\bar{y}_c + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{x,ef}^2 - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 \right) \\ m_{y,ef} &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{ef}} \left(-\bar{x}_c - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{xy,ef}^2 + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{i}_{y,ef}^2 \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_{ef} &= 1 - \bar{A}_{oc}; \Delta \bar{A}_k = \Delta A_k / A; \Delta \bar{A}_{ko} = \Delta A_{ko} / A; \bar{A}_{oc} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \Delta \bar{A}_{ko}; \\ \bar{y}_c &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{y}_{ko} \Delta \bar{A}_{ko}; \bar{x}_c = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{x}_{ko} \Delta \bar{A}_{ko}; \bar{i}_{x,ef}^2 = \frac{I_x}{\rho_x^2 A} - \bar{i}_{x,oc}^2; \\ \bar{i}_{x,oc}^2 &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{y}_{ko}^2 \Delta \bar{A}_{ko}; \bar{i}_{y,ef}^2 = \frac{I_y}{\rho_y^2 A} - \bar{i}_{y,oc}^2; \\ \bar{i}_{y,oc}^2 &= \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k^2 \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{x}_{ko}^2 \Delta \bar{A}_{ko}; \bar{i}_{xy,ef}^2 = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k + \sum_{k_o=1}^{n_o} \tilde{x}_{ko} \tilde{y}_{ko} \Delta \bar{A}_{ko}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

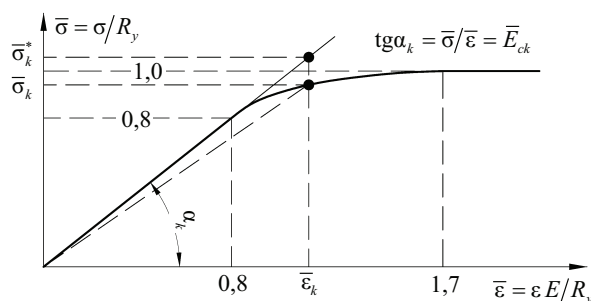


Рис. 2. Унифицированная диаграмма работы стали

Fig. 2. Unified steel work diagram

Для нередуцированных сечений φ , m_x , m_y определяются по выражению (4), в которых относительные характеристики ослабления сечения в формуле (5), учитывающие только физическую нелинейность, устанавливаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_{oc} &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \Delta \bar{A}_k \\ \bar{y}_c &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k \\ \bar{x}_c &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \Delta \bar{A}_k \\ \bar{i}_{x,oc}^2 &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k \\ \bar{i}_{y,oc}^2 &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k^2 \Delta \bar{A}_k \\ \bar{i}_{xy,ef}^2 &= \sum_{k=1}^{n+n_p} (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Имея предельные значения параметров усилий φ , m_x , m_y , проверку прочности неослабленных сечений можно свести к виду:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1, \quad (7)$$

где

$$c_p = \varphi(1 + m_x + m_y) > 1. \quad (8)$$

При этом следует заметить, что вместо используемых в СП 16.13330.2017³ трех коэффициентов n , c_x , c_y получен один — c_p . Влияние повреждений представим коэффициентом:

$$K_{oc} = \varphi_{ef} (1 + m_{x,ef} + m_{y,ef}) [\varphi(1 + m_x + m_y)]^{-1}, \quad (9)$$

тогда проверка прочности ослабленного сечения приобретает вид:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p K_{oc}} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1. \quad (10)$$

Исследование прочности элементов с повреждениями в обратной последовательности, как это отмечалось в работе [16], позволяет сократить время расчета на несколько порядков и получить необходимый для разработки практических рекомендаций объем данных. Однако, имея эти результаты, аналитическое построение зависимости коэффициентов c_p и K_{oc} от многих факторов оказалось весьма трудным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью разработки практических рекомендаций рассмотрим пример расчета двутаврового элемента и покажем влияние ослаблений пояса и его места расположения относительно действующих усилий N , M_x , M_y (табл.) на прочность выраженного K_{oc} . Анализируя представленные в таблице результаты, можно констатировать:

- ослабление площадью 6,07 %, находящееся в наиболее нагруженных зонах (сектор I и III), снижает прочность соответственно на 19,2–22,3 % и 13–17,9 %, что в 2,2–3,7 раз больше повреждения;
- в менее нагруженных секторах II и IV в зависимости от $m_{x,ef}$, $m_{y,ef}$ и их соотношений можно наблюдать как снижение (2,4–12,7 %), так и увеличение (5,7–18,7 %) прочности. Последнее объясняется тем, что ослабление в секторе II приводит к смещению центра тяжести сечения, уменьшая значения M_y ($m_{y,ef} = 0,5–1$) с его разгружающим действием. В секторе IV аналогичное действие оказывает M_x .

Практические рекомендации по расчету поврежденных элементов на прочность

Пример расчета прочности поврежденного элемента, а также многие другие исследования [6, 7, 13] показали, что наихудшее влияние оказывают повреждения, находящиеся в наиболее нагруженной зоне. Это свидетельствует о необходимости выбора специальной расчетной комбинации усилий.

Учитывая изложенное, рассмотрим нагружение стрелы в сечении N_{ef} , $M_{x,ef}$, $M_{y,ef}$, имеющем в наиболее нагруженной зоне (рис. 3) ослабление пояса площадью $A_{f,0}$ с координатами центра тяжести $x_{f,0}$, $y_{f,0}$ и стенки $A_{w,0}$ с $x_{w,0} = 0$, $y_{w,0}$.

Редуцированное сечение заменим на нередуцированное с компенсирующим догружением фиктивными силами $N_{f,0} = \sigma_{f,0} \cdot A_{f,0}$ и $N_{w,0} = \sigma_{w,0} \cdot A_{w,0}$, которые определяются по фиктивным напряжениям в центре тяжести ослаблений:

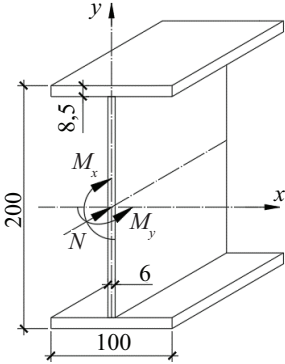
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{f,0} &= \frac{\sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) K_2 + \sigma(0, y_{f,0}) \bar{A}_{w,0} K_3}{K_1 K_2 - \bar{A}_{f,0} \bar{A}_{w,0} K_3^2} \\ \sigma_{w,0} &= \frac{\sigma(0, y_{w,0}) K_1 + \sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) \bar{A}_{f,0} K_3}{K_1 K_2 - \bar{A}_{f,0} \bar{A}_{w,0} K_3^2} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где

$$K_1 = 1 - \bar{A}_{f,0} \left(1 + \frac{y_{f,0}^2}{i_x^2} + \frac{x_{f,0}^2}{i_y^2} \right);$$

³ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М., 2017. 139 с.

Коэффициент влияния ослабления сечения K_{oc} на прочность
Coefficient of influence of weakening of the K_{oc} section on strength

Схема загрузки Loading scheme	Относительные эксцентриситеты Relative eccentricities		Место расположения ослабления пл. 6,07 % The location of the weakening ar. 6.07 %			
	$m_{x,ef}$	$m_{y,ef}$				
	0,5	0,5	800	1072	870	873
		1	808	1057	861	884
		3	795	952	861	887
		5	777	947	851	878
	1	0,5	800	1073	848	904
		1	810	1061	856	886
		3	801	956	861	891
		5	786	949	855	884
	2	0,5	798	1075	836	1096
		1	804	1065	844	913
		3	802	987	856	890
		5	794	953	856	889
	4	0,5	790	1077	821	1187
		1	793	1070	827	1144
		3	796	999	841	909
		5	795	976	848	892

Примечание: значения коэффициентов K_{oc} увеличены в 1000 раз.
Note: the values of the coefficients K_{oc} are increased by 1,000 times.

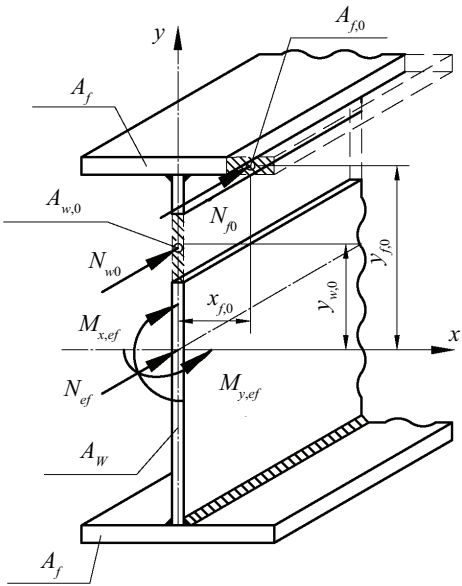


Рис. 3. Ослабленное поперечное сечение элемента и действующие усилия

Fig. 3. Weakened element cross-section and acting forces

$$K_2 = 1 - \bar{A}_{w,0} \left(1 + \frac{y_{w,0}^2}{i_x^2} \right);$$
$$K_3 = 1 + \frac{y_{f,0} y_{w,0}}{i_x^2}; \quad \bar{A}_{f,0} = A_{f,0} / A; \quad \bar{A}_{w,0} = A_{w,0} / A;$$
$$\sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{f,0} + \frac{M_{y,ef}}{I_y} x_{f,0};$$
$$\sigma(0, y_{w,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{w,0}.$$

Тогда проверку прочности можно выполнить по СП 16.13330.2017³, как для неповрежденных элементов:

$$\left(\frac{N}{\gamma_c A R_y} \right)^n + \frac{M_x}{\gamma_c c_x R_y W_x} + \frac{M_y}{\gamma_c c_y R_y W_y} \leq 1, \quad (12)$$

где

$$N = N_{ef} + N_{f,0} + N_{w,0};$$
$$M_x = M_{x,ef} + N_{f,0} \cdot y_{f,0} + N_{w,0} \cdot y_{w,0};$$
$$M_y = M_{y,ef} + N_{f,0} \cdot x_{f,0}.$$

При одном ослаблении ($A_{w,0} = 0$) имеем $\sigma_{f,0} = \sigma(x_{f,0}, y_{f,0})/K_{11}$, что полностью совпадает с формулой (6) Пособия (с. 17)¹.

Совершенствование практического метода расчета неповрежденных элементов

Метод расчета на прочность элементов по СП 16.13330.2017³ при действии в сечении двух и более усилий, кроме сжатия с изгибом в плоскости большей жесткости N и M_x , содержит существенный недостаток: взаимное влияние усилий на развитие пластических деформаций не учитывается, что приводит к заниженным результатам.

В настоящей статье на основании результатов исследования предложен инженерный метод расчета, лишенный указанного недостатка. Для этого на первом этапе усовершенствуем расчет на прочность отдельной сжато-изогнутой с параметрами $\bar{N}_{пл} = N_{пл}/R_y A_{пл}$ и $\bar{M}_{пл} = M_{пл}/R_y W_{пл}$ пластинки, который без учета коэффициента условий работы γ_c представим в виде:

$$\left(\frac{\bar{N}_{пл}}{K_M}\right)^{3/2} + \frac{\bar{M}_{пл}}{1,47} \leq 1, \quad (13)$$

где

$$K_M = 1 + 0,12\bar{M}_{пл} - 0,19(\bar{M}_{пл}^2 - \bar{M}_{пл}^3). \quad (14)$$

Коэффициент дополнительного влияния $\bar{M}_{пл}$ на $\bar{N}_{пл}$ (14) сформирован по результатам настоящего исследования. Задаваясь значением $\bar{M}_{пл}$ из выражения (13), можно с высокой степенью точности определить предельное значение продольной силы:

$$\bar{N}_{пл} = K_M^{3/2} \sqrt{1 - \frac{\bar{M}_{пл}}{1,47}}, \quad (15)$$

что будет использовано при составлении практических рекомендаций.

Сопоставление результатов расчета и практические рекомендации при действии M_x и M_y

На графиках (рис. 4) показаны кривые предельных состояний $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$ двутавровых элементов при $\alpha_f = A_f/A_w = 0,25 - 2,0$. Сплошные линии соответствуют разработанному методу, точечные — «нормативному»³. Очевидно, что последний существенно занижает предельные усилия. Выявленные резервы прочности показаны на рис. 5, где представлено сопоставление коэффициентов использования. При $\bar{M}_y/\bar{M}_x \geq 0,2$ резервы составляют от 8 до 32 %. Большие из них соответствуют $\alpha_f = 0,25 - 0,5$, меньшие $\alpha_f = 1,0 - 2,0$.

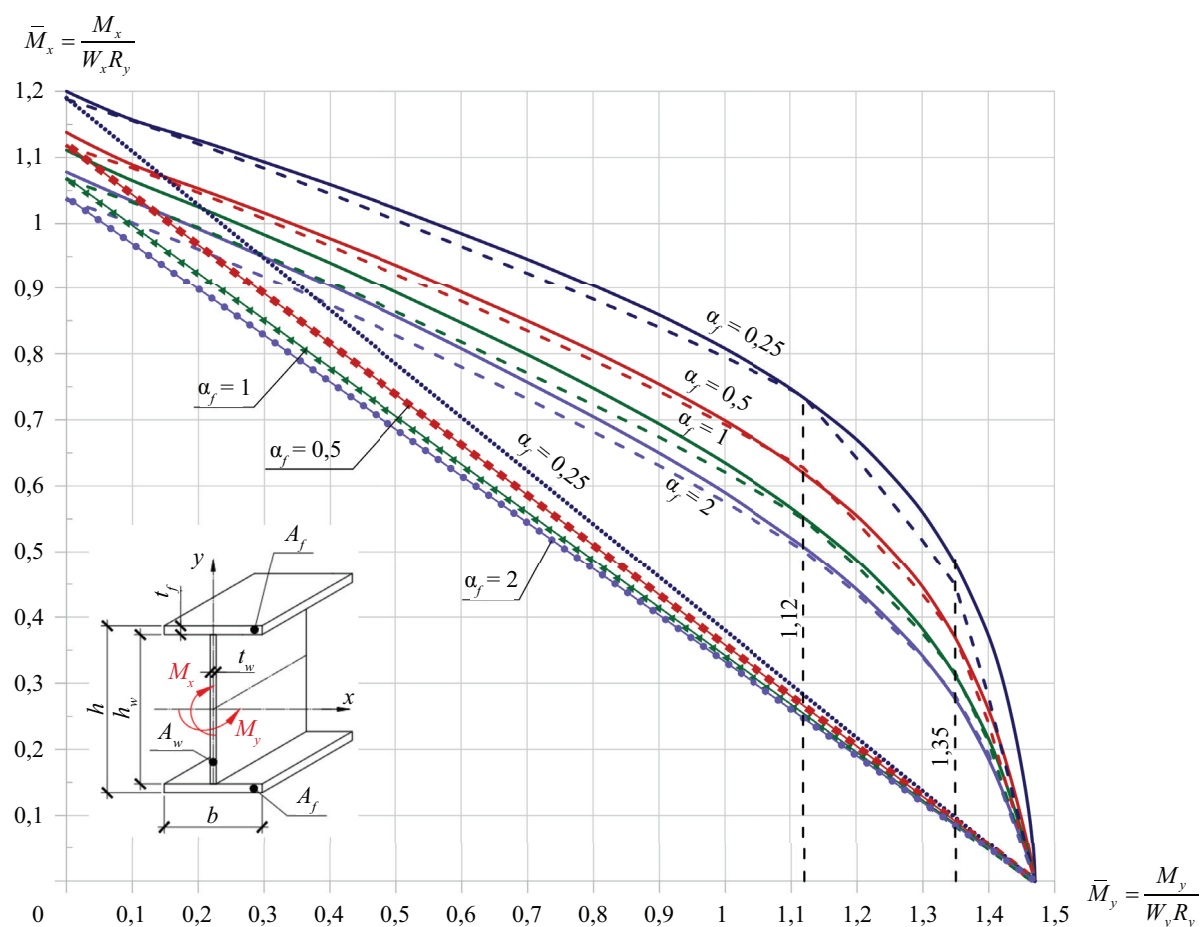


Рис. 4. Кривые предельных состояний при действии $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

Fig. 4. Curves of limit states in action $\bar{M}_x$ and $\bar{M}_y$

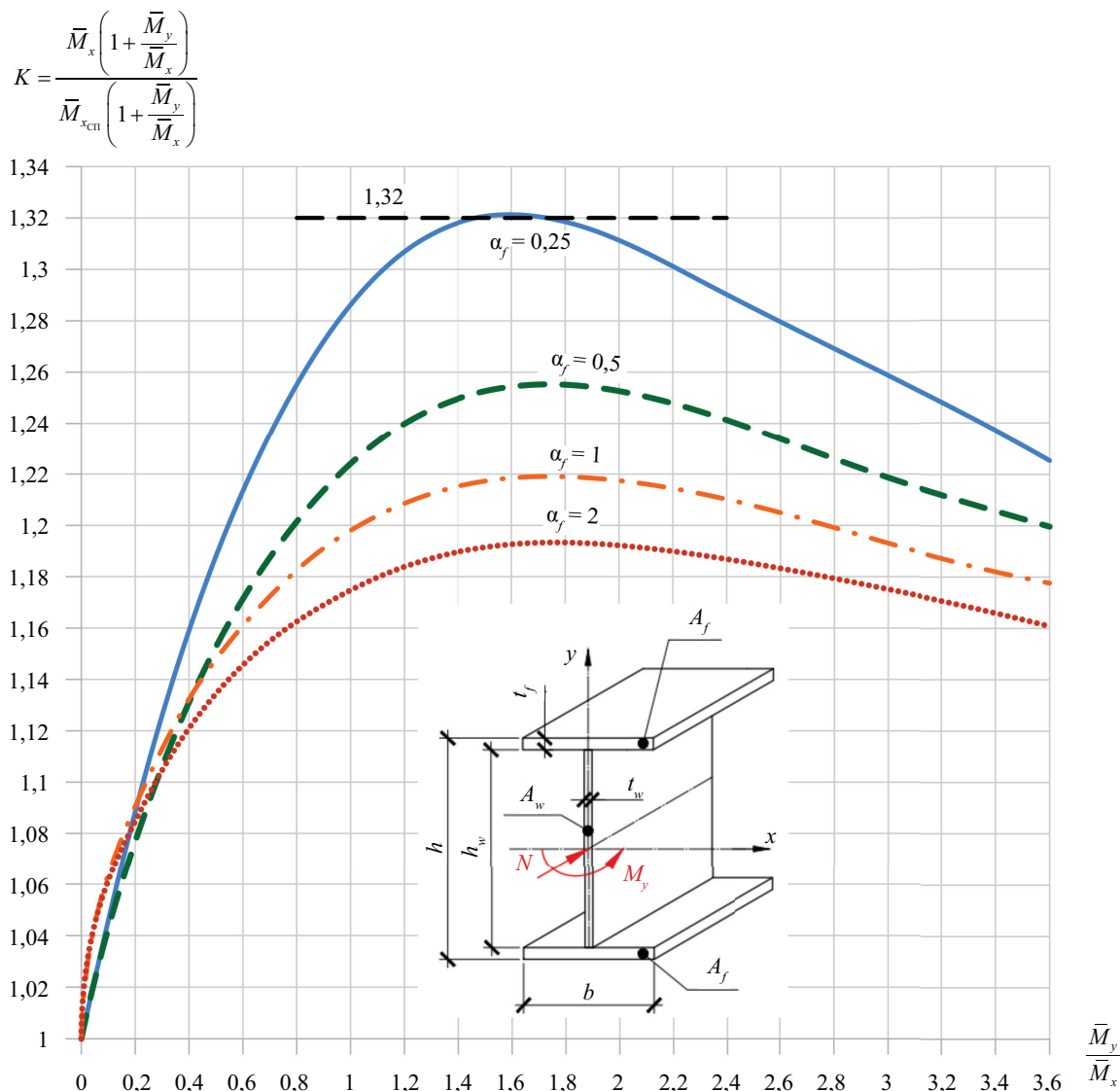


Рис. 5. Резервы прочности при действии $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$
 Fig. 5. Reserves of strength in action $\bar{M}_x$ and $\bar{M}_y$

Практические рекомендации с учетом выражения (15) представим в виде:

$$\frac{\bar{M}_x (1 + 6\alpha_f)}{\gamma_c (c_{x,w} + 6\alpha_f K_{M_y} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_y/1,47})} \leq 1, \quad (16)$$

где

$$c_{x,w} = \begin{cases} 1,47 - 0,32 \bar{M}_y / 1,12 & \text{при } \bar{M}_y \leq 1,12; \\ 0,76 + 0,39 (1,35 - \bar{M}_y) / 0,23 & \text{при } 1,12 \leq \bar{M}_y \leq 1,35; \\ 0,76 (1,47 - \bar{M}_y) / 0,12 & \text{при } 1,35 \leq \bar{M}_y \leq 1,47. \end{cases}$$

Коэффициент $c_{x,w}$ характеризует влияние $\bar{M}_y$ на изгибающий момент в стенке, который получен по результатам настоящего исследования.

Предельные значения $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$ по формуле (16) показаны на рис. 4 пунктирными линиями,

которые хорошо согласуются с результатами проведенного исследования.

Резервы прочности прямоугольных труб при действии $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ находятся в тех же пределах 8–31 %. Практические рекомендации разработаны также по результатам исследования, которые имеют вид:

$$\frac{\bar{M}_x (1 + 6\alpha_f)}{\gamma_c [1,47 (1 - K_{y,w} \bar{M}_y) + 6\alpha_f K_{M_y} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_y/1,47}]} \leq 1, \quad (17)$$

где

$$K_{y,w} = \begin{cases} 0,06 \bar{M}_y / 0,3 & \text{при } \bar{M}_y \leq 0,3; \\ 0,06 + 0,9 (\bar{M}_y - 0,3) / 0,7 & \text{при } \bar{M}_y \geq 0,3. \end{cases}$$

При $\bar{M}_y \leq 1/K_{y,w}$ в выражении (17) принимается: $1 - K_{y,w} \bar{M}_y = 0$.

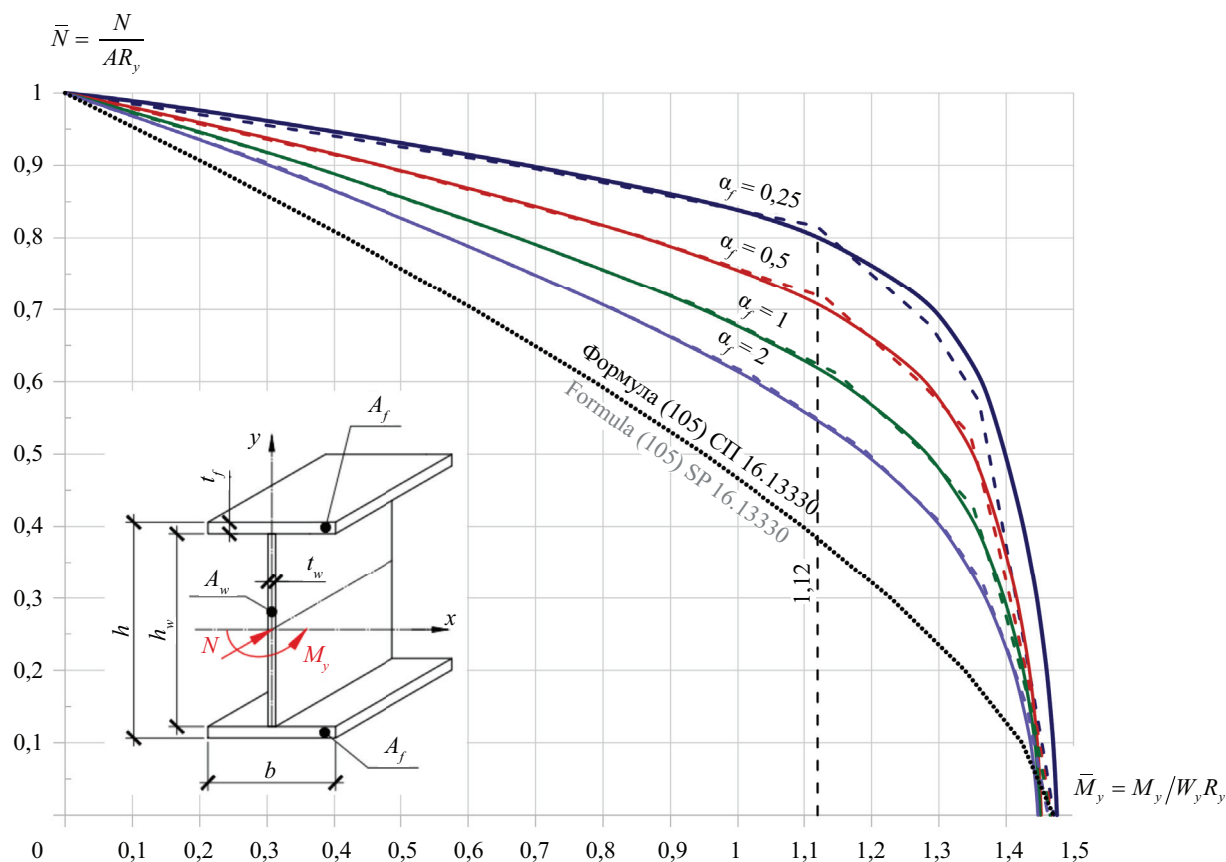


Рис. 6. Кривые предельных состояний при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$

Fig. 6. Curves of limit states in action $\bar{N}$ and $\bar{M}_y$

Сопоставление результатов расчета

и практические рекомендации при действии N и M_y

Графики (рис. 6, 7) свидетельствуют также о выявленных резервах, которые для двутавровых элементов составляют (см. рис. 7) от 4–11 % при $\bar{M}_y \leq 0,4$ до 29 % при $\bar{M}_y > 0,4$.

Практические рекомендации (см. пунктирные линии на рис. 6) имеют аналогичный (16) вид:

$$\frac{\bar{N}(1+2\alpha_f)}{\gamma_c \left(K_w + 2\alpha_f K_{M_y} \sqrt[3]{1 - \bar{M}_y/1,47} \right)} \leq 1, \quad (18)$$

где

$$K_w = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{M}_y \leq 1,12; \\ \frac{1,47 - \bar{M}_y}{0,35} & \text{при } 1,12 \leq \bar{M}_y \leq 1,47. \end{cases}$$

Коэффициент K_w учитывает фактическую часть продольной силы, которую воспринимает стенка, чего не обнаруживает «нормативный»³ метод.

Сопоставление результатов расчета при действии N, M_x, M_y

На рис. 8 сплошными линиями показаны кривые предельных состояний $\bar{M}_x, \bar{M}_y$ для двутавро-

вых элементов с $\alpha_f = 0,5$ при различных значениях $\bar{N}$, построенные по результатам настоящего исследования. Там же пунктирными линиями приведены соответствующие данные «нормативного»³ метода. Сопоставляя их, можно констатировать, что СП 16.13330.2017³ при трехпараметрическом нагружении значительно больше занижает предельные усилия, чем при двухпараметрических.

Резервы прочности иллюстрируются графиками на рис. 9. Видно, что при средних значениях $\bar{N} = 0,4 - 0,6$ ($m_y/m_x \geq 0,3$) они находятся в пределах 10–45 %. Малым значениям $\bar{N} \leq 0,2$ соответствуют снижения этих резервов в 1,5 раза, большим $\bar{N} \geq 0,8$ — в 2,5 раза. При $0,25 \leq \alpha_f \leq 0,5$ приведенные параметры увеличиваются, а при $0,5 \leq \alpha_f \leq 2$ наоборот — уменьшаются.

В связи с трудностями аналитического описания физической нелинейности предельного состояния при действии N, M_x, M_y практические рекомендации в настоящее время находятся в разработке. При этом заметим, что результаты исследования могут быть использованы в графическом виде (см. кривые предельных состояний на рис. 8), которые с помощью обратного метода могут быть получены для более широкого класса практических задач.

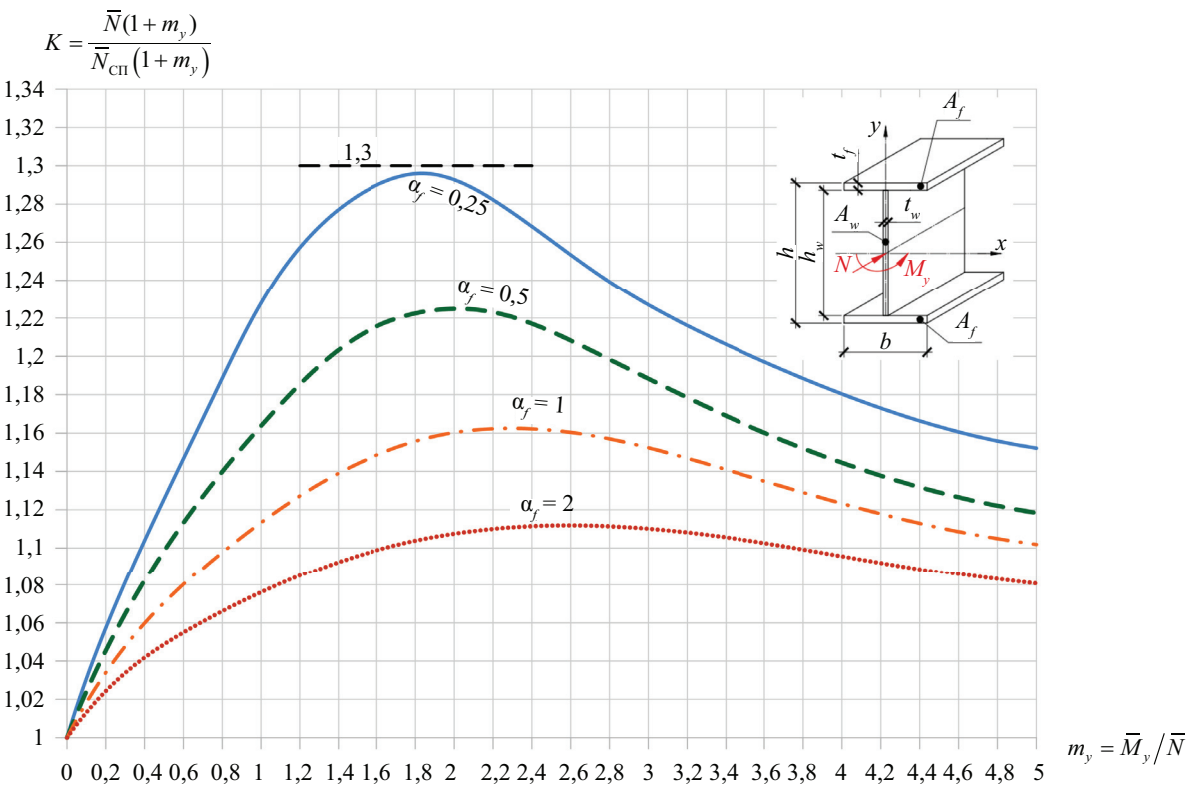


Рис. 7. Резервы прочности при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$
Fig. 7. Reserves of strength in action $\bar{N}$ and $\bar{M}_y$

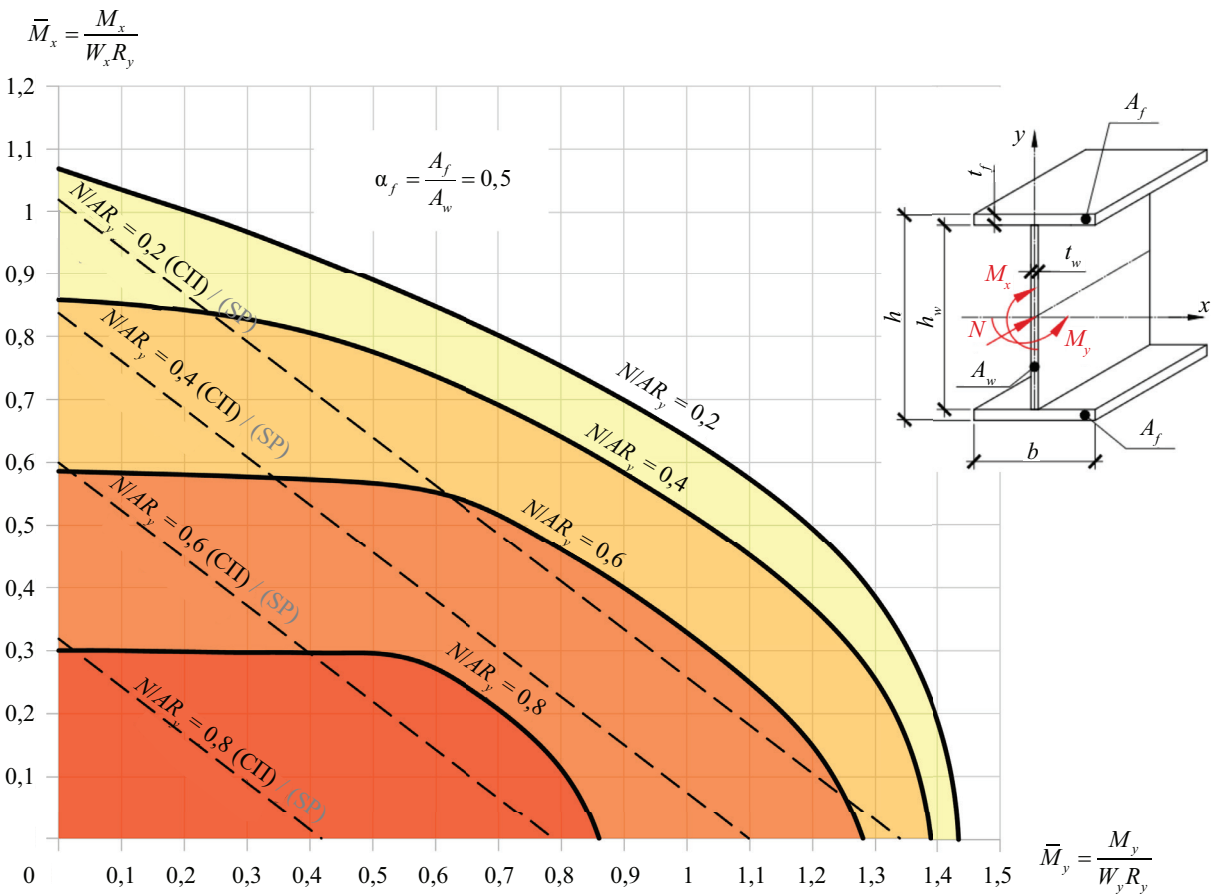


Рис. 8. Кривые предельных состояний при действии $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$
Fig. 8. Curves of limit states in action $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ and $\bar{M}_y$

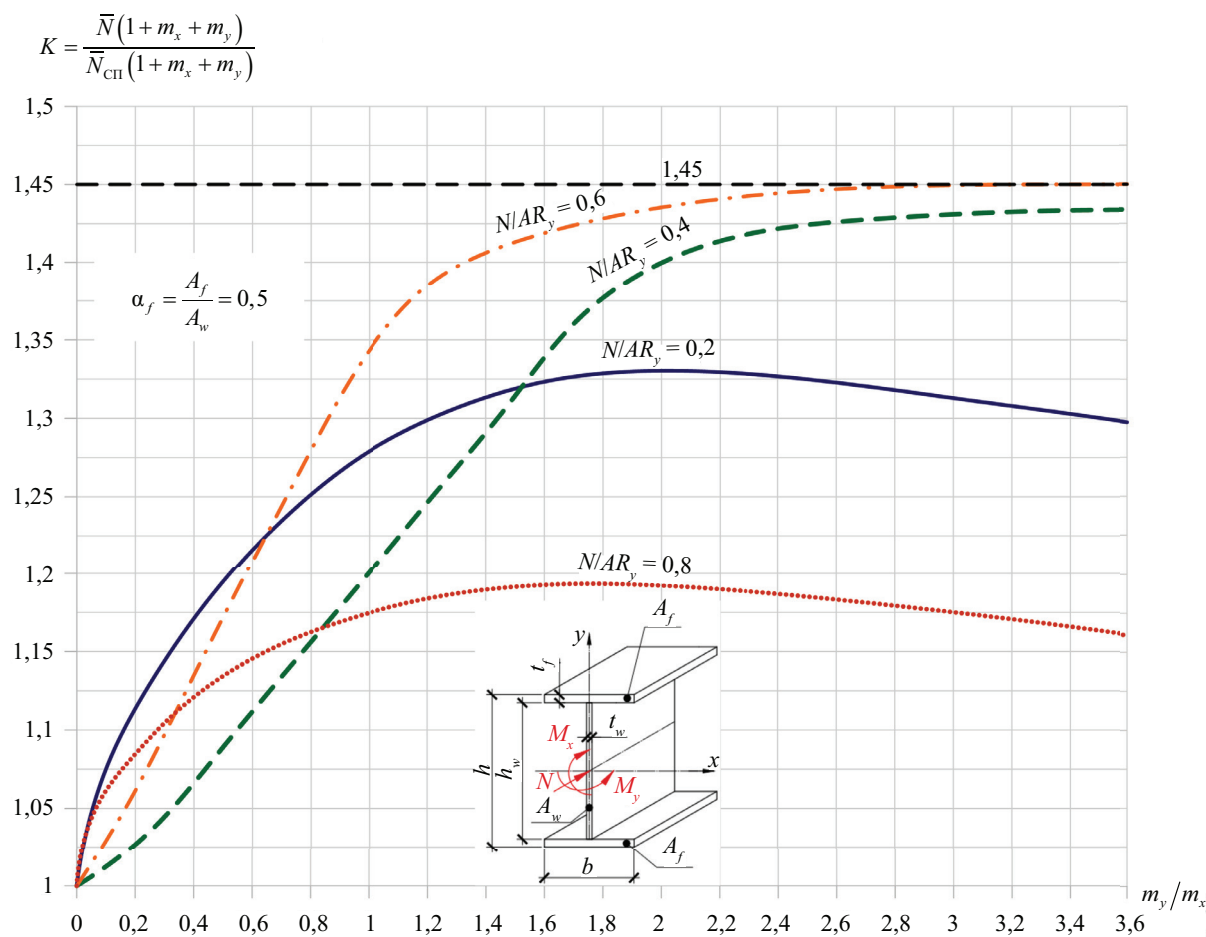


Рис. 9. Резервы прочности при действии $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

Fig. 9. Reserves of strength in action $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ and $\bar{M}_y$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработан метод исследования прочности поврежденных и неповрежденных элементов стальных конструкций при общем нагружении с учетом взаимного влияния усилий на развитие пластических деформаций. Решение задачи проводится в безразмерных параметрах в обратной последовательности, что дает возможность сократить время расчета на несколько порядков.

На основании анализа полученных результатов исследования разработан эффективный практический метод расчета поврежденных и неповрежденных элементов, позволяющий получить более достоверные сведения об их прочности.

Установлено влияние повреждения на прочность, которое в зависимости от места его распо-

ложения относительно действующих усилий N , M_x , M_y может привести элемент к работоспособному, ограниченно- или неработоспособному состоянию.

Выявлены резервы прочности двутавровых элементов в зависимости от соотношений площадей пояса и стенки $\alpha_f = A_f/A_w$, которые находятся в пределах:

- при двухпараметрических нагружениях M_x и M_y — 8–32 %, N и M_y — 4–29 %;
- при трехпараметрическом нагружении ($\alpha_f = 0.5$) N , M_x и M_y — 10–45 %.

Запасы прочности двутавровых элементов оказались весьма существенными, что указывает на актуальность исследования прочности стержней с другими наиболее распространенными в практике проектирования типами сечений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Di Sarno L., Majidian A., Karagiannakis G. The effect of atmospheric corrosion on steel structures: a state-of-the-art and case-study // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 12. P. 571. DOI: 10.3390/buildings11120571

2. Zhao Z., Zhang N., Wu J., Gao Y., Sun Q. Shear capacity of steel plates with random local corrosion // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 239. P. 117816. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117816

3. Kong Z., Jin Y., Hossen G.M.S., Hong S., Wang Y., Vu Q.V. et al. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild steel after corrosion // Ocean Engineering. 2022. Vol. 246. P. 110652. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110652

4. Белый Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Строительная механика сооружений. 1983. С. 40–48.

5. Стегачев П.Б. Исследование вопросов оценки эксплуатационного состояния стальных стропильных ферм : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982. 27 с.

6. Сотников Н.Г. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций из спаренных уголков, имеющих общие и местные дефекты и повреждения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1987. 28 с.

7. Родиков Н.Н. Устойчивость сжатых стержневых элементов конструкций из открытых профилей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1987. 27 с.

8. Лакусса К.С.Э. Прочность и пространственная устойчивость стержней из одиночных уголков : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1993. 26 с.

9. Мункуева Е.М. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций крестового сечения, имеющих общие и местные дефекты и повреждения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 22 с.

10. Косоруков В.А. Влияние случайных погнутостей сжатых стержней стальных стропильных ферм на их несущую способность : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 12 с.

11. Опанчук А.А. Несущая способность стержней ферм из уголков с местными дефектами : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1983. 241 с.

12. Корчак М.Д. О влиянии местных начальных искривлений пояса на устойчивость решетчатого стержня // Совершенствование развития норм проектирования стальных строительных конструкций. 1981. С. 119–127.

13. Асташкин М.В. Напряженно-деформированные и предельные состояния в сечениях стержневых элементов стальных конструкций при общем случае статического нагружения : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2003. 130 с.

14. Белый Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 46–55. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-5. EDN FCYLVLT.

15. Ведерникова А.А. Численно-аналитический расчет устойчивости внецентренно сжатых трубобетонных стержней круглого и квадратного сечения // Вестник СевКавГТИ. 2017. № 3 (30). С. 112–118. EDN ZSIVVL.

16. Смирнов М.О. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей с фактически редуцированным сечением : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 157 с.

17. Смирнов М.О. Совершенствование обратного численно-аналитического метода расчета ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 46–52. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52. EDN TDGIAI.

18. Смирнов М.О. Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутых профилей при однопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 60–67. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67. EDN NXYLAC.

19. Белый Г.И., Гарипов А.И. Запредельные напряженно-деформированные состояния в поперечных сечениях элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (93). С. 16–30. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-16-30. EDN MPRVNX.

20. Zhang Z., Xu S., Wang Y., Nie B., Wei T. Local and post-buckling behavior of corroded axially-compressed steel columns // Thin-Walled Structures. 2020. Vol. 157. P. 107108. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107108

21. Kullashi G., Siriwardane S.C., Attaya M.A. Lateral torsional buckling capacity of corroded steel beams: A parametric study // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1201. Issue 1. P. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012038

Поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 7 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Григорий Иванович Белый — доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 272945; office@erkon.ru;

Егор Андреевич Матвеев — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1169062; egormatveev7798@gmail.com.

Вклад авторов:

Белый Г.И. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, вывод формул, написание исходного текста, итоговые выводы.

Матвеев Е.А. — проведение расчетов и сопоставительного анализа, написание текста и подготовка изображений.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Di Sarno L., Majidian A., Karagiannakis G. The effect of atmospheric corrosion on steel structures: a state-of-the-art and case-study. *Buildings*. 2021; 11(12):571. DOI: 10.3390/buildings11120571
2. Zhao Z., Zhang N., Wu J., Gao Y., Sun Q. Shear capacity of steel plates with random local corrosion. *Construction and Building Materials*. 2020; 239:117816. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117816
3. Kong Z., Jin Y., Hossen G.M.S., Hong S., Wang Y., Vu Q.V. et al. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild steel after corrosion. *Ocean Engineering*. 2022; 246:110652. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110652
4. Bely G.I. Calculation of elastic-plastic thin-walled rods according to a spatially deformable scheme. *Construction Mechanics of Structures*. 1983; 40-48. (rus.).
5. Stegachev P.B. *Study of issues of assessing the operational condition of steel roof trusses : abstract of thesis. dis. ... cand. tech. sci.* Leningrad, 1982; 27. (rus.).
6. Sotnikov N.G. *Strength and stability of elements of steel structures from paired corners having general and local defects and damages : abstract of thesis. dis. ... cand. tech. sci.* Leningrad, 1987; 28. (rus.).
7. Rodikov N.N. *Stability of compressed core elements of structures made of open profiles : dis. ... cand. tech. sci.* Leningrad, 1987; 27. (rus.).
8. Lacussa K.S.E. *Strength and spatial stability of rods made from single angles : abstract of thesis. dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 1993; 26. (rus.).
9. Munkueva E.M. *Strength and stability of elements of cross-section steel structures having general and local defects and damages : dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 1999; 22. (rus.).
10. Kosorukov V.A. *The influence of random bends of compressed rods of steel trusses on their load-bearing capacity : dis. ... cand. tech. sci.* Moscow, 1975; 12. (rus.).
11. Oplanchuk A.A. *Load-bearing capacity of truss rods made from angles with local defects : dis. ... cand. tech. sci.* Novosibirsk, 1983; 241. (rus.).
12. Korchak M.D. On the influence of local initial curvatures of the belt on the stability of a lattice rod. *Improving the development of design standards for steel building structures*. 1981; 119-127. (rus.).
13. Astashkin M.V. *Stress-strain and limit states in sections of rod elements of steel structures in the general case of static loading : dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 2003; 130. (rus.).
14. Bely G.I. "Reverse" method of calculating steel structure rod elements reinforced under load by increasing cross sections. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83):46-55. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46. EDN FCYLVLT. (rus.).
15. Vedernikova A.A. Numerical and analytical calculation of stability of non-centrally compressed round and square tube concrete rods. *Bulletin of SevKavGTI*. 2017; 3(30):112-118. EDN ZSIVVL. (rus.).
16. Smirnov M.O. *Strength and stability of rod elements of structures made of cold-formed profiles with an actually reduced cross-section : dis. ... cand. tech. sci.* St. Petersburg, 2021; 157. (rus.).
17. Smirnov M.O. Improvement of the inverse numerical-analytical method for calculating the light steel thin-walled structures for stability under eccentric compression. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 1(84):46-52. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52. EDN TDGIAI. (rus.).
18. Smirnov M.O. Improving the methodology for determining reduced cross-sections of rods from cold-formed profiles at one-parameter loading. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 2(79):60-67. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67. EDN NXYLAC. (rus.).
19. Bely G.I., Garipov A.I. Post-limit stress-strain states of steel structure elements in cross-sections. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 4(93):16-30. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-16-30. EDN MPRVNX. (rus.).
20. Zhang Z., Xu S., Wang Y., Nie B., Wei T. Local and post-buckling behavior of corroded axially-compressed steel columns. *Thin-Walled Structures*. 2020; 157:107108. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107108
21. Kullashi G., Siriwardane S.C., Atteya M.A. Lateral torsional buckling capacity of corroded steel beams: A parametric study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1201(1):012038. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012038

Received August 28, 2023.

Adopted in revised form on September 27, 2023.

Approved for publication on February 7, 2024.

B I O N O T E S: **Grigory I. Belyy** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor-consultant of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 272945; office@erkon.ru;

Egor A. Matveev — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1169062; egormatveev7798@gmail.com.

Contribution of the authors:

Grigory I. Belyy — scientific supervising, research concept, development of methodology, derivation of formulas, writing of the source text, final conclusions.

Egor A. Matveev — carrying out calculations and comparative analysis, writing text and preparing images.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568

Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках

Ашот Георгиевич Тамразян, Йехия Ахмед Котп Сайед

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается актуальный вопрос перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках, подвергающихся коррозии. Статически неопределимые железобетонные балки широко используются в различных строительных приложениях, и понимание того, как коррозия влияет на перераспределение моментов в таких балках, является важным для оценки их несущей способности и безопасности. Применяются экспериментальные и аналитические методы для изучения влияния коррозии на перераспределение моментов в железобетонных балках.

Материалы и методы. Использована новая техника для ускорения и контроля присутствующей коррозии, применяемой в соответствии с экспериментальной программой. Испытаны четыре двухпролетных железобетонные балки с коррозией и без при изгибающем моменте.

Результаты. Экспериментальные результаты сравнили между собой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что коррозия оказывает существенное влияние на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках. Перераспределение моментов увеличивается с ростом процента коррозии. Предлагаемая модель позволяет в значительной степени определить коэффициент перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках.

Выводы. Исследование подчеркивает существенное влияние коррозии на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках. Полученные результаты показывают, что с увеличением процента коррозии происходит соответствующее увеличение перераспределения моментов. Полученные результаты могут стать основой для разработки будущих стратегий по снижению влияния коррозии на статически неопределимые железобетонные балки, что будет способствовать улучшению проектирования конструкций и практики их эксплуатации в строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: статически неопределимые железобетонные балки, перераспределение моментов, коррозия, метод ускоренной коррозии, пластический шарнир, надежность, прочность конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 557–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568

Автор, ответственный за переписку: Йехия Ахмед Котп Сайед, engyehia250@gmail.com.

Comparing moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams with and without corrosion

Ashot G. Tamrazyan, Yehia Ahmed Kotp Sayed

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The actual question of redistribution of moments in statically indeterminate reinforced concrete (RC) beams subjected to corrosion is considered. Statically indeterminate RC beams are widely used in various construction applications, and understanding how corrosion affects the redistribution of moments in such beams is important for assessing their load-bearing capacity and safety. Experimental and analytical methods are applied to study the effect of corrosion on the redistribution of moments in RC beams.

Materials and methods. To carry out this investigation, a new technique was implemented to accelerate and control the corrosion process, applied according to the experimental programme. Four two-span reinforced concrete beams, both with and without induced corrosion, were subjected to bending moments in the experimental setup. The methods involved careful application of corrosion, and the experimental programme aimed to simulate real-world conditions.

Results. The experimental results were compared for the beams with and without corrosion. The analysis revealed significant effects of corrosion on the redistribution of moments in statically indeterminate reinforced concrete beams. Furthermore, the de-

gree of corrosion was found to be directly proportional to the increased redistribution of moments. Moreover, the proposed model can significantly determine the redistribution coefficient of moments in statically indeterminate RC beams.

Conclusions. This study highlights the significant influence of corrosion on the redistribution of moments in statically indeterminate reinforced concrete beams. The results obtained show that as the corrosion percentage increases, there is a corresponding increase in the redistribution of moments. The results obtained can provide a basis for the development of future strategies to reduce the effects of corrosion on statically indeterminate reinforced concrete beams, thereby improving structural design and construction practices.

KEYWORDS: statically indeterminate RC beams, moments redistribution, corrosion, accelerated corrosion method, plastic hinge, reliability, structural strength

FOR CITATION: Tamrazyan A.G., Sayed Ye.A.K. Comparing moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams with and without corrosion. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):557-568. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568 (rus.).

Corresponding author: Yehia Ahmed Kotp Sayed, engyehia250@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия — распространенная проблема в железобетонных конструкциях, влияющая на их прочность и структурную целостность, со временем может привести к дорогостоящим ремонтам или в худшем случае к катастрофическим отказам [1–5]. Среди конструктивных элементов статически неопределимых железобетонных балок имеют большое значение для несущей способности и безопасности [6, 7]. Рассмотрен актуальный вопрос перераспределения моментов в железобетонных балках, подвергающихся коррозии. Перераспределение моментов в статически неопределимых балках хорошо изучено в строительной инженерии [8, 9], влияние коррозии на этот феномен менее исследовано. По мере развития коррозии внутри бетона она изменяет свойства материала, что может привести к неожиданному структурному поведению [5, 10].

Имеются многочисленные работы, в которых рассматривается влияние коррозии на элементы из бетона [11, 12]. Исследователи определили химические и электрохимические процессы, вызывающие и прогрессирующие коррозию в железобетонных конструкциях, уделив особое внимание негативному воздействию на прочность и структурную целостность [13, 14]. Раскрашивание, отслоение и потеря сцепления между арматурой и бетоном — широко известные проявления коррозии [15]. Они приводят к преждевременному разрушению и ухудшению эксплуатационных характеристик железобетонных конструкций [16].

Перераспределение моментов — важный аспект поведения конструкций в статически неопределимых балках [17]. Понимание того, как в этих балках распределяются моменты и адаптируются к изменениям условий нагружения, является фундаментальным для обеспечения их структурной безопасности [18].

Накопленный опыт изучения перераспределения моментов в статически неопределимых балках [6–9] привел к разработке методологий и руководств проектирования, которые позволяют инженерам точно предсказывать и контролировать перераспределение моментов [17, 18]. Однако влияние коррозии на перераспределение моментов в таких балках

остается относительно неисследованной областью. Взаимодействие коррозии и перераспределения моментов представляет собой уникальное и сложное поле для изучения. В то время как коррозия, вызванная деградацией материала, достаточно хорошо рассмотрена, ее специфические эффекты на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках менее понятны. В настоящее время ограниченное количество публикаций прямо затрагивали взаимодействие коррозии и перераспределения моментов в железобетонных балках [19, 20], что подчеркивает необходимость всестороннего изучения для заполнения имеющихся пробелов в знаниях в этой области. Более того, нормативные документы не рассматривали вопрос перераспределения моментов при наличии коррозии и ее различные эффекты на работоспособность статически неопределимых железобетонных балок.

Цель данной статьи — изучение влияния коррозии на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках путем сочетания экспериментального исследования и аналитических методов. Понимая, как коррозия воздействует на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках, инженеры и исследователи могут создавать более точные прогностические модели, оценивать безопасность существующих конструкций и разрабатывать эффективные стратегии борьбы с коррозией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По экспериментальной программе четыре железобетонные балки с двумя пролетами, размерами $120 \times 150 \times 2150$ мм, были доведены до разрушения. Бетон, используемый в экспериментальной программе, класса В20. Конфигурация балок, детали армирования, а также нагрузочная и опорная схемы показаны на рис. 1. Балки были симметрично армированы двумя стержнями диаметром 12 мм сверху и снизу, а также замкнутыми стержнями диаметром 6 мм, расположенными через 75 и 150 мм.

Прочность полученного бетона определена через одноосное сжатие на кубах размером $100 \times 100 \times 100$ мм. Во время заливки балок подготовлено

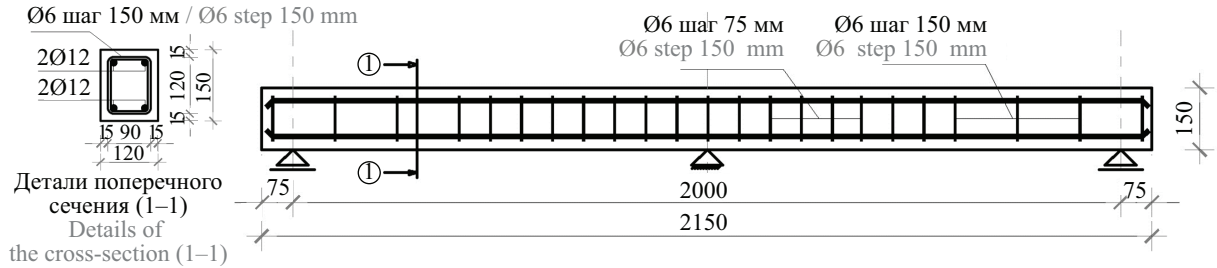


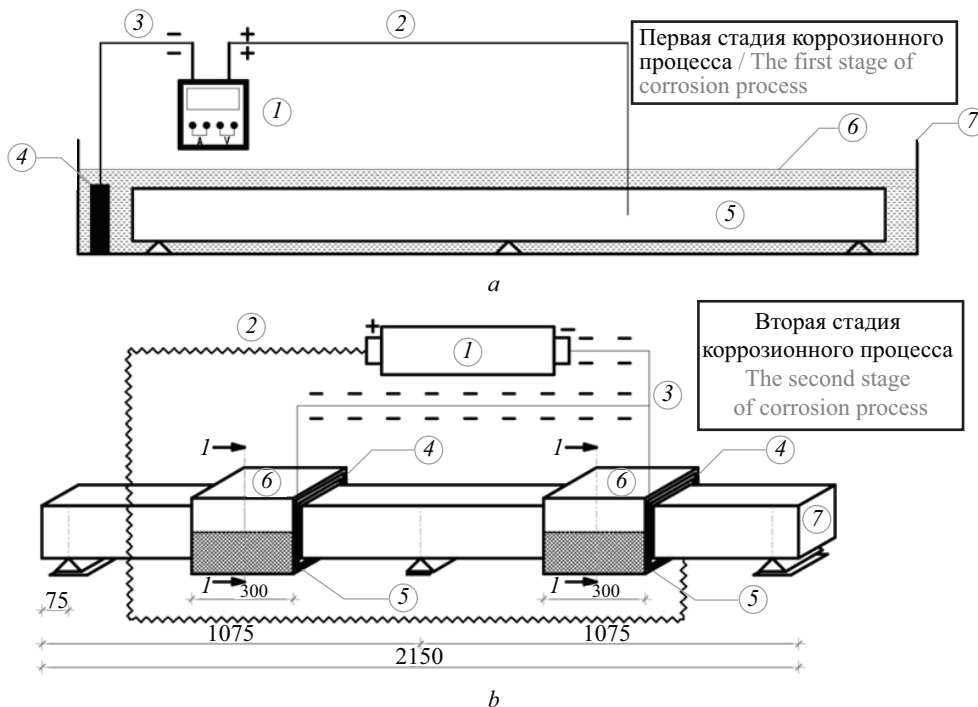
Рис. 1. Детали экспериментальной балки

Fig. 1. Details of the experimental RC beam

и выдержано вместе с балками шесть образцов кубов бетона и три призмы. Средняя прочность испытанных кубов бетона через 28 дней F_{cu} составила 24,6 МПа. Кроме того, проведено одноосное нагружение бетонных призм размером $100 \times 100 \times 400$ мм. Для измерения вертикальных и горизонтальных деформаций во время испытаний на сжатие на каждую грань образцов призм установили два электрических деформационных датчика. Средняя прочность испытанного бетона R_b оказалась равной 18,5 МПа, с предельными деформациями ε_u 0,0024, модулем упругости бетона E_c 20 887 МПа и коэффициентом Пуассона 0,16. Предполагаемое отношение между прочностью цилиндра f'_c и прочностью призмы определено как $f'_c = 1,067 R_b$, что дало среднюю прочность цилиндра на сжатие $f'_c = 19,75$ МПа. Предел текучести стал $R_{sy} = 551$ МПа, максимальная прочность при растяжении — $R_{su} = 646$ МПа. Модуль упругости E_s для стержней диаметром 12 мм составлял 201 ГПа, с пределом текучести 379 МПа и максимальной прочностью при растяжении 511 МПа. Модуль упругости для замкнутых стержней диаметром 6 мм определен как 200 ГПа.

Использован ускоренный метод коррозии, аналогичный работам J. Xia и соавт. (2011) и J. Shen и соавт. (2019) [21, 22], который разделен на две фазы: электромиграцию и циклическое сухое и влажное воздействие. Этот подход позволил точно контролировать рассматриваемую область и процент коррозии. Коррозия была нацелена на зоны растяжения в серединах пролетов балок с процентами коррозии соответственно 20 и 30 %.

Описание процесса ускоренной коррозии следующее. Ионы хлорида электромигрировали в защитный слой бетона с помощью электрохимического метода во время электромиграции. Каждая железобетонная балка погружалась в 5%-ный раствор NaCl на 1,25 дня. Затем направление тока скорректировано таким образом, что внешний стержень из нержавеющей стали стал катодом, а встроенные листы из нержавеющей стали — анодом. Непрерывное напряжение 30 В было подано в течение четырех дней между внешним стержнем из нержавеющей стали и вложенными в него листами из нержавеющей стали с применением источника постоянного тока. После процесса электромиграции



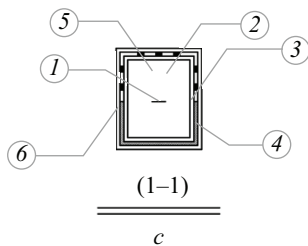


Рис. 2. Детали метода ускоренной коррозии: *a*: 1 — источник питания; 2 — электрический провод, несущий положительный заряд; 3 — электрический провод, несущий отрицательный заряд; 4 — отрицательным электродом служит стержень из нержавеющей стали; 5 — железобетонная неразрезная балка; 6 — вода с 5%-ным NaCl; 7 — резервуар для воды; *b*: 1 — источник питания; 2 — электрический провод, несущий положительный заряд; 3 — электрический провод, несущий отрицательный заряд; 4 — поролон для сохранения соленой воды; 5 — сетка из нержавеющей стали; 6 — пластиковый бакет для экономии воды; 7 — железобетонная неразрезная балка; *c*: 1 — отрицательным электродом служит стержень из нержавеющей стали; 2 — железобетонная неразрезная балка; 3 — поролон для сохранения соленой воды; 4 — сетка из нержавеющей стали; 5 — наполнитель; 6 — пластиковый бакет для экономии воды

Fig. 2. Details of the accelerated corrosion method: *a*: 1 — power supply; 2 — electrical wire carrying positive charges; 3 — electrical wire carrying negative charges; 4 — a stainless steel rod serves as the negative electrode; 5 — the RC continuous beam; 6 — water with 5 % NaCl; 7 — water tank; *b*: 1 — power supply; 2 — electrical wire carrying positive charges connecting to the reinforcing steel; 3 — electrical wire carrying negative charges; 4 — sponge to save salty water; 5 — stainless steel mesh; 6 — plastic bag to save water; 7 — the RC continuous beam; *c*: 1 — stainless steel rod serves as negative electrode; 2 — the RC continuous beam; 3 — sponge to save salty water; 4 — stainless steel mesh; 5 — filler; 6 — plastic bag to save water

проведена фаза циклического сухого и влажного воздействия. Циклы сушки и влажности состояли из трех дней сушки, за которыми следовали четыре дня увлажнения. Во время увлажнения на губку наносился 5%-ный раствор NaCl для поддержания влажности в бетоне. Источник постоянного тока использовался для подачи постоянной плотности тока 300 мА/см² на протяжении всего процесса увлажнения. Этот ток пропусклся через продольную арматуру в середине пролетов (действуя как анод) и сетку из нержавеющей стали (действуя как катод). Целью было достичь 20 и 30%-ной коррозии стали соответственно через 66 и 101 день (рис. 2). Балки разместили на испытательной машине в соответствии с необходимыми параметрами для проведения испытаний (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментальной установке статически неопределимые железобетонные балки подвергались сосредоточенным нагрузкам, которые действовали в середине каждого пролета. Это позволило собрать ценные данные, включая наблюдения за режимами разрушения, зависимость прогиба от нагрузки, деформации от нагрузки и перераспределения моментов. В контрольных статически неопределимых железобетонных балках отмечались типичные изгибные разрушения (рис. 4). Однако при исследовании корродированных статически неопределимых железобетонных балок наблюдалась другая тенденция. Эти балки испытывали комбинированные изгибные разрушения при сдвиге, при этом степень разрушения при сдвиге была более выражен-



a

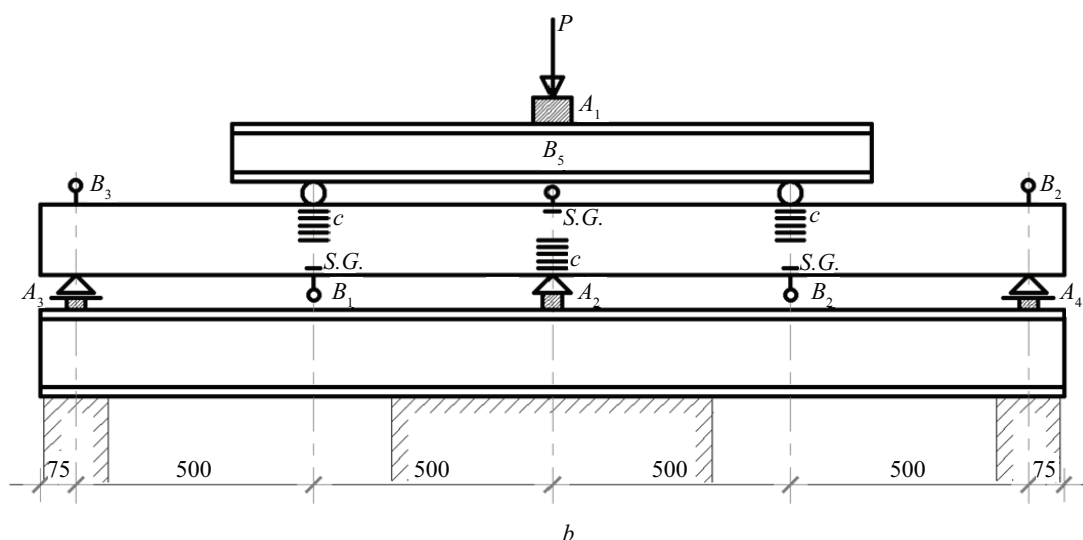


Рис. 3. Испытательная машина (а) и схема испытания железобетонной балки (b): А — силв измерения тензодатчиком; В — дифференциальные трансформаторы для определения линейного перемещения; S.G. — тензометрический датчик на продольном стержне арматуры; С — тензометрические датчики на бетоне

Fig. 3. Test machine (a) and test diagram of the RC beam (b): A — strain gauge measuring force; B — differential transformers for determining linear displacement; S.G. — strain gauge on longitudinal reinforcement bar; C — strain gauges on concrete

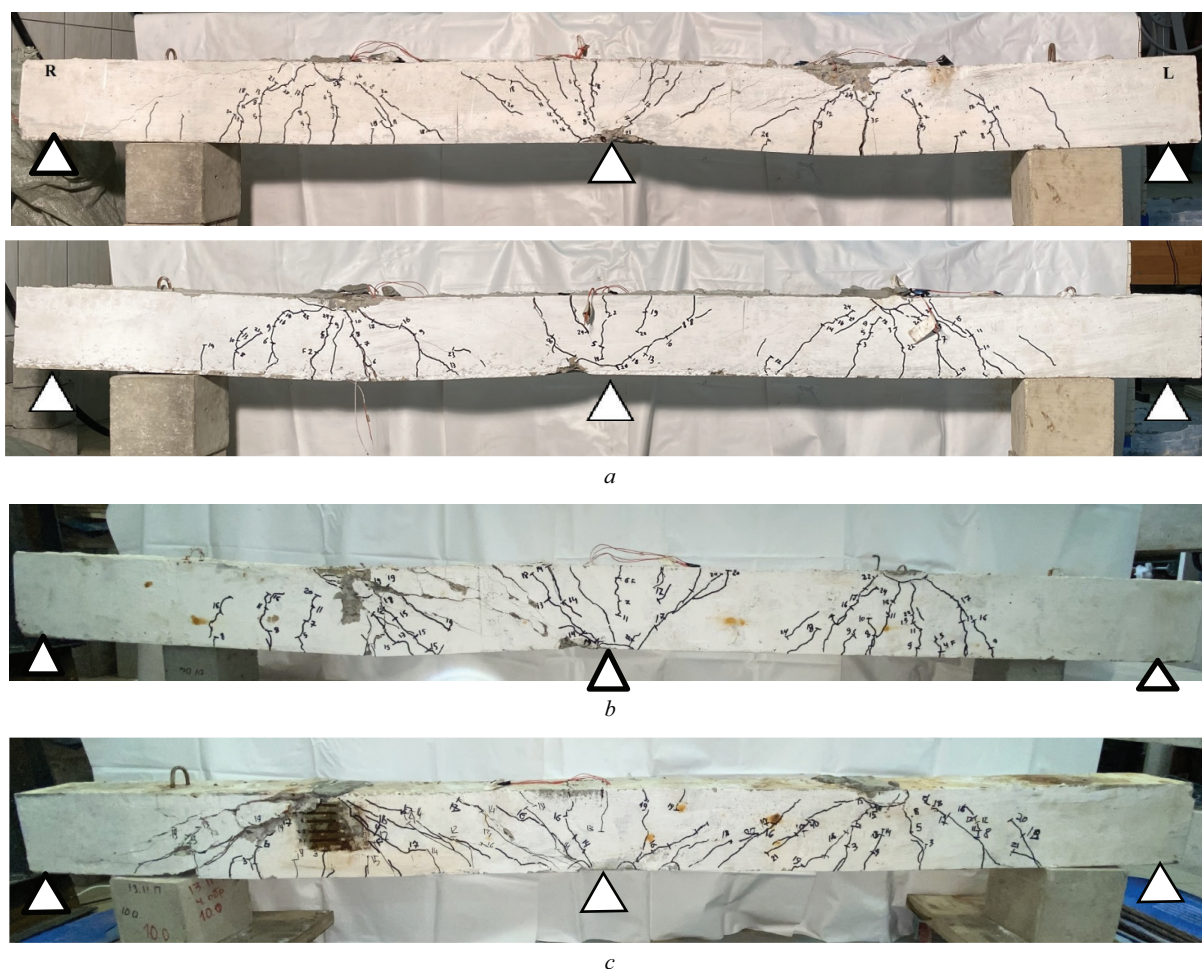


Рис. 4. Схемы разрушения железобетонных балок: а — ВС; b — PCMS-20; c — PCMS-30

Fig. 4. Failure schemes of the tested RC beams: a — BC; b — PCMS-20; c — PCMS-30

Основные экспериментальные результаты испытанных железобетонных образцов
Experimental results of tested reinforced concrete specimens

Образец Specimen	BC	PCMS-20	PCMS-30
Степень коррозии, % Corrosion rate, %	—	20	30
Нагрузка трещинообразования, кН First crack load, kN	14,96	16,08	16,04
Нагрузка предела текучести стали в середине опоры, кН Load at the steel yield stress at the middle of the support, kN	134	48,20	86,72
Первая нагрузка предела текучести стали в середине пролета, кН Load at the first steel yield stress at the mid-span, kN	175	96,94	
Вторая нагрузка предела текучести стали в середине пролета, кН Load at the second steel yield stress at the mid-span, kN		155,33	
Предельная нагрузка, кН Ultimate load, kN	185,02	161,58	123,87
Перераспределение моментов на средней опоре β , % Moments redistribution at the middle support β , %	14,6	27,4	46,5

ной в случаях более высоких уровней коррозии, например в балке с коррозией 30 % (PCMS-30). Такое поведение можно объяснить деградацией, вызванной коррозией, которая влияет как на хомуты, так и на бетон. В результате корродированные балки проявляли сниженную сдвиговую прочность по сравнению с некорродированными образцами. Деградационные эффекты также сказывались на предельной несущей способности балок из-

за коррозии. Например, в балке с коррозией 20 % (PCMS-20) предельная нагрузка снизилась до 162 кН, что составляет 12,7 % относительно контрольных образцов. Аналогично в балке с коррозией 30 % (PCMS-30) предельная нагрузка снизилась до 124 кН, что составляет 33 % относительно контрольных балок (табл. и рис. 5).
На рис. 5 показана зависимость нагрузки от прогиба испытанных образцов. Наблюдает-

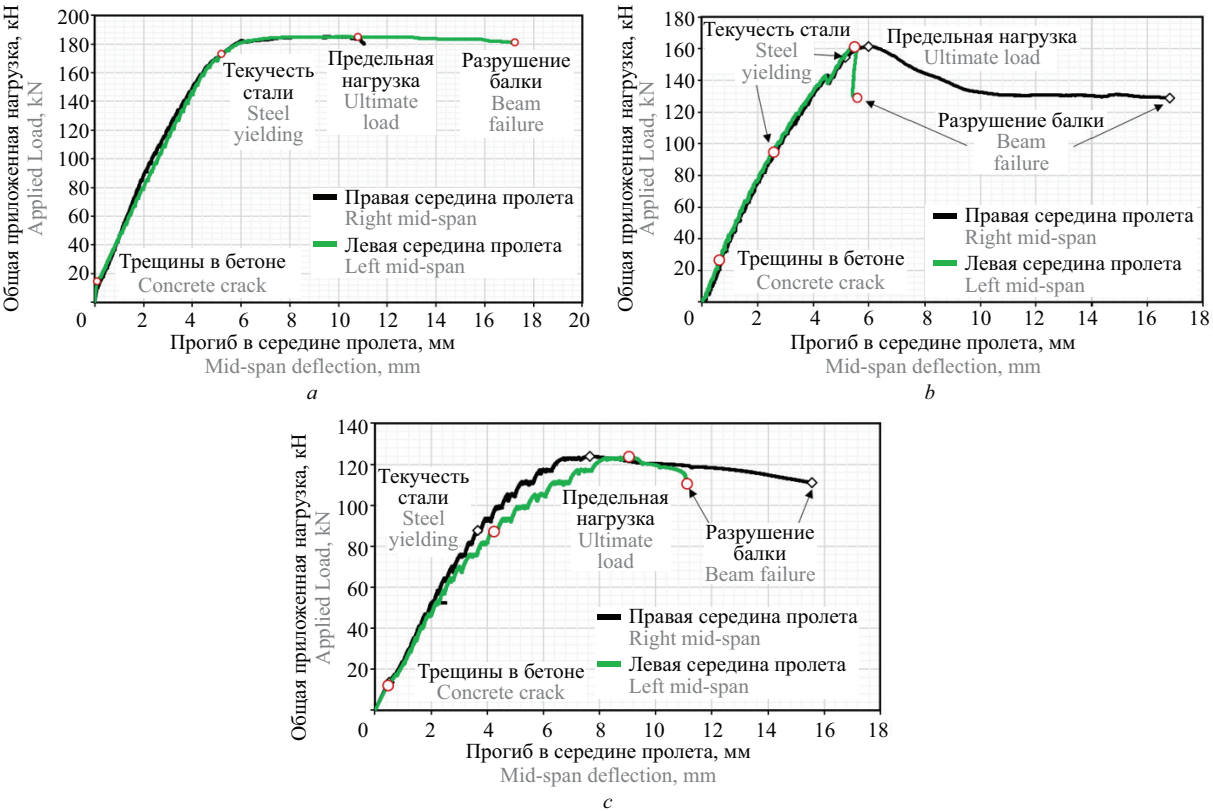


Рис. 5. Реакция балки нагрузка – прогиб: а — BC; b — PCMS-20; c — PCMS-30
Fig. 5. Load-deflection response of the tested RC beam: a — BC; b — PCMS-20; c — PCMS-30

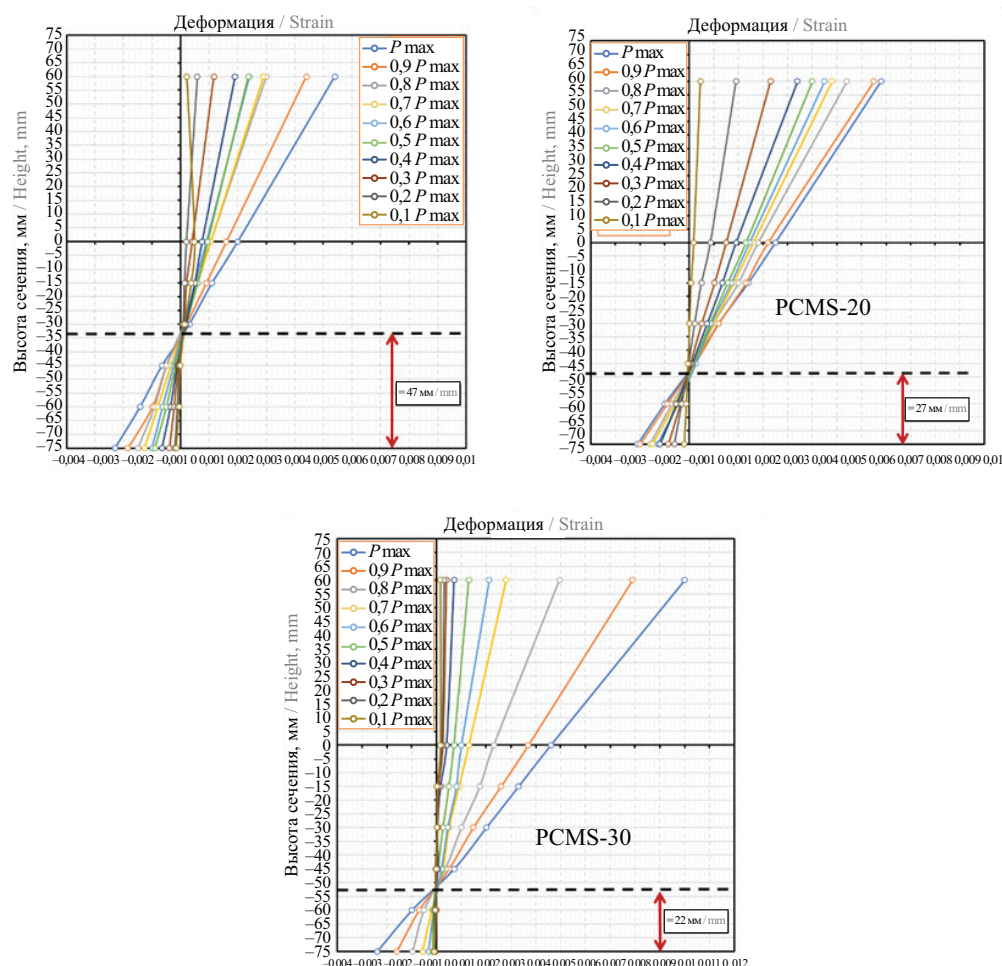


Рис. 6. График зависимости деформации от нагрузки для стали и бетона на средней опоре

Fig. 6. Load vs strain response for RC beam cross-section at the middle support

ся заметное различие между некорродированными или контрольными железобетонными балками и их корродированными аналогами. Контрольные балки проявляют большую пластичность при приложении нагрузки. Эта повышенная пластичность имеет важное значение в строительной инженерии, поскольку она указывает на способность конструкции к значительным деформациям при сохранении несущей способности. В корродированных железобетонных балках, напротив, наблюдалось снижение пластичности, что объясняется, прежде всего, коррозионным разрушением как материала бетона, так и арматурной стали. Уменьшенная пластичность, обнаруженная в корродированных образцах, подчеркивает актуальность стратегий по предотвращению коррозии и сохранению структурной целостности, особенно в условиях, подверженных вызовам коррозии.

Отклик нагрузки — деформации балок, испытанных в средних сечениях опор, показан на рис. 6, предоставляя ценные сведения об их деформационном поведении. Становится очевидным, что коррозия значительно влияет на положение нейтральной

оси изгибаемых железобетонных балок. С увеличением степени коррозии относительная высота сжатой зоны бетона уменьшается, что приводит к более выраженному эффекту перераспределения моментов. Особенно заметно увеличение коэффициента перераспределения моментов, превышающее втрое по сравнению с контрольными образцами при сравнении образца PCMS-30 (с 30%-ной коррозией) (см. табл.).

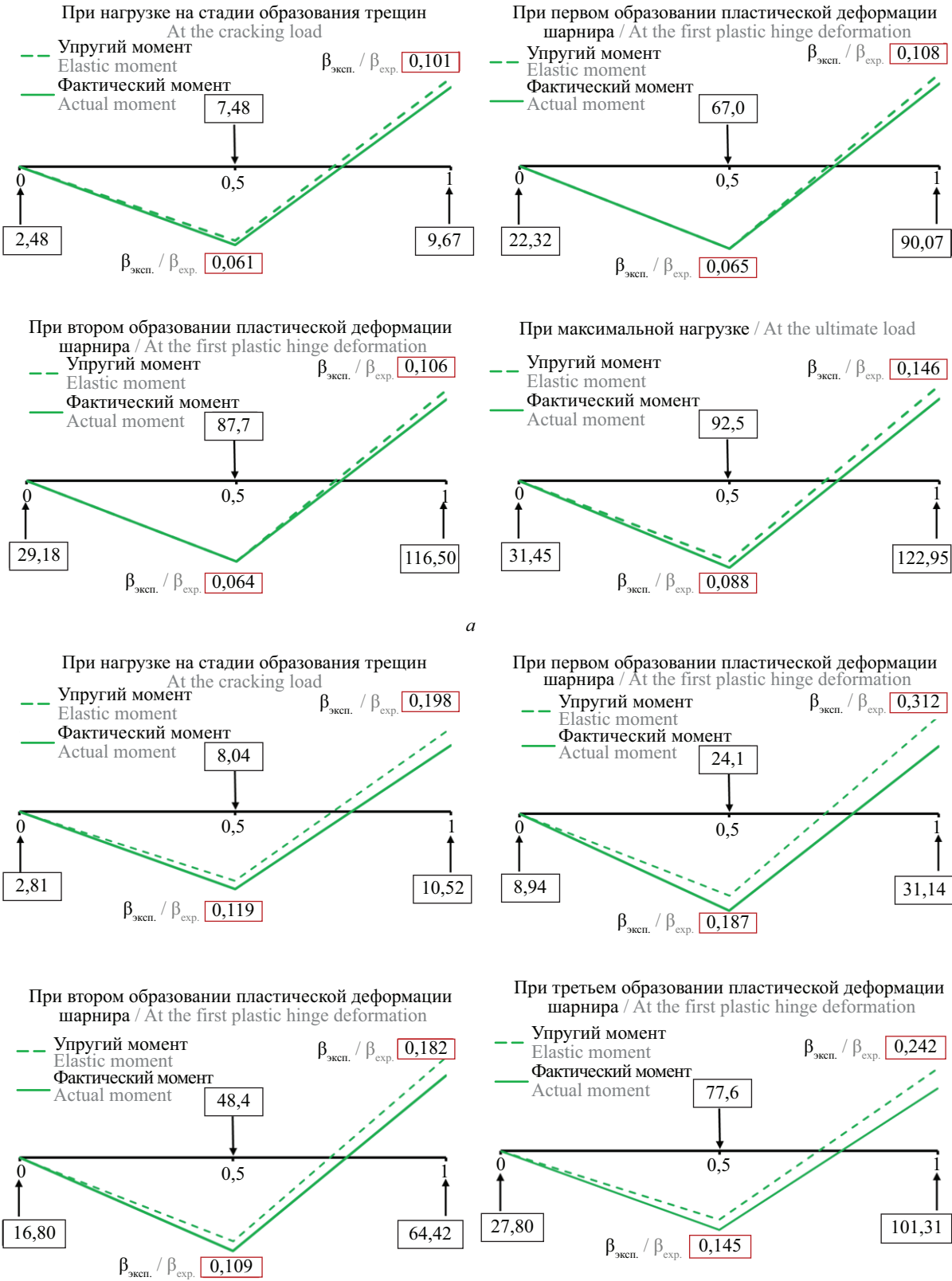
Феномен перераспределения моментов под критическими нагрузками показан на рис. 7. В случае контрольных балок коэффициент фактического перераспределения моментов составляет 0,146 для средней опоры и 0,088 для среднего пролета. В свою очередь, для образца PCMS-20 при предельных нагрузках коэффициент перераспределения моментов возрастает до 0,274 на средней опоре и 0,165 на среднем пролете. Более того, в случае образца PCMS-30 при предельных условиях нагрузки коэффициент перераспределения моментов заметно повышается до 0,465 на средней опоре и 0,274 на среднем пролете.

Экспериментальные данные, приведенные в настоящей статье, послужат основой для предложения модификации модели, изначально представленной авторами в 2022 г. [15]. Указанная модифицированная модель направлена на повышение точности прогнозирования перераспределения мо-

ментов в корродированных статически неопределимых железобетонных балках.

Модифицированная модель

Среди существующих моделей для прогнозирования коэффициента перераспределения мо-



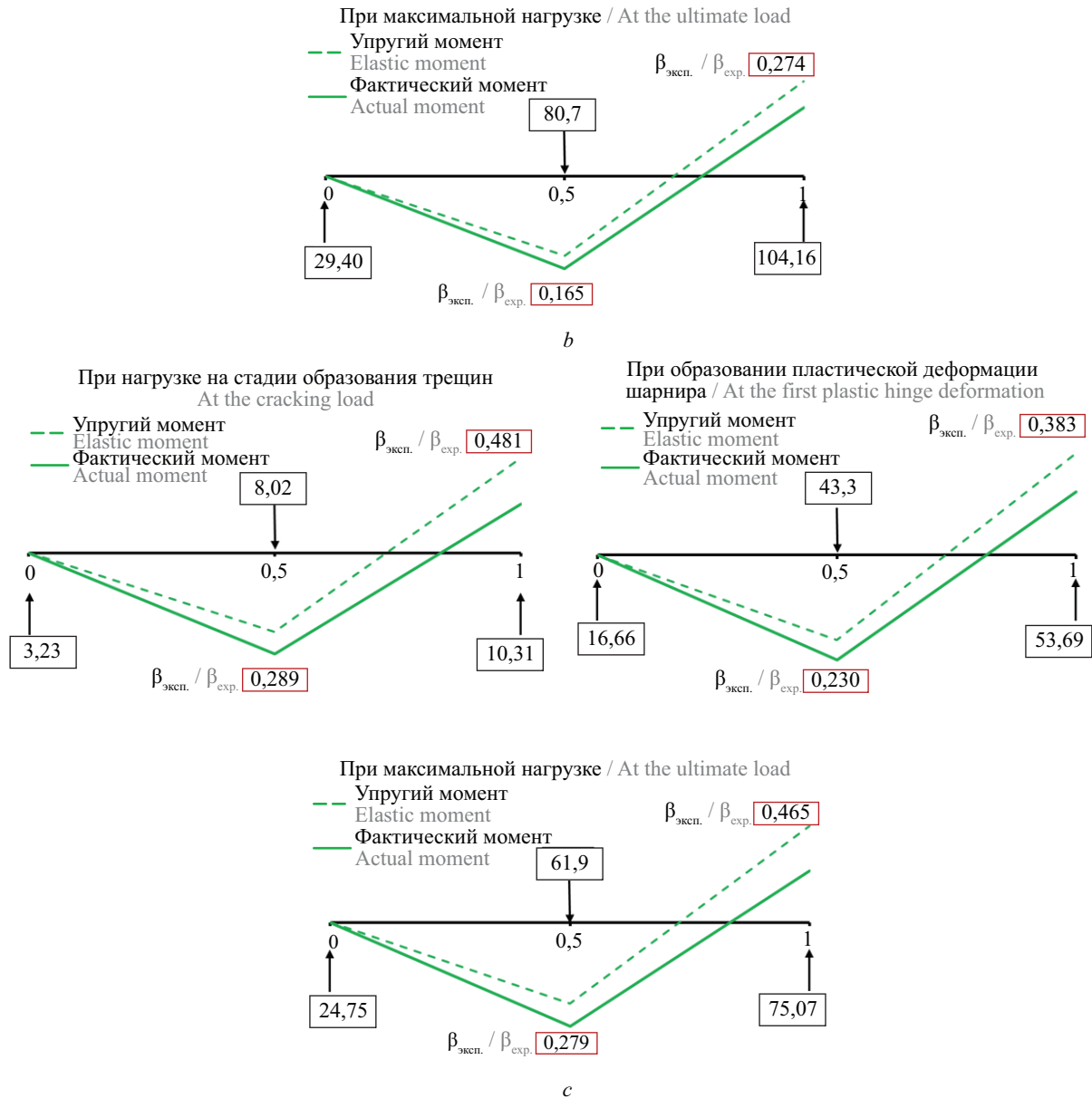


Рис. 7. Экспериментальный и упругий изгибающий момент испытуемой балки: *a* — ВС на разных стадиях нагрузки; *b* — PCMS-20 на разных стадиях нагрузки; *c* — PCMS-30 на разных стадиях нагрузки

Fig. 7. Experimental and elastic bending moment of the tested beam: *a* — BC beam at different critical load; *b* — PCMS-20 beam at different critical load; *c* — PCMS-30 beam at different critical load

ментов в железобетонных балках работа авторов (2022) [18] выделяется своей высокой точностью прогнозирования. Предложенная модель может быть выражена следующим образом:

$$\beta_{\text{рас}} = \left(0,001 \frac{R_{sy}}{(1,067 R_b)} + 0,05 (\mu_w, \%) + 0,0035 \frac{L}{h} \right) - \left(0,74 \frac{x}{h_0} + 0,13 \cdot \rho_{s1} / \rho_{s2} \right) + 0,4612, \quad (1)$$

где параметры для данной экспериментальной программы равны: R_{sy} — предел текучести арматуры = 551 МПа; R_b — прочность бетона на сжатие = 18,5 МПа; $\mu_w, \%$ — коэффициент армирования хомутов в средней опорной зоне = 0,31; L/h — гибкость балки = 6,67; $\xi = x/h_0$ — относительная высота сжатой зоны бетона = 0,35; ρ_{s1}/ρ_{s2} — отношение коэффициентов армирования на средней опоре к среднему пролету = 1,00.

Предлагаемая модифицированная модель, учитывающая эффект коррозии, представлена следующим образом:

$$\beta_{\text{рас}} = \left(0,0008 \frac{R_{sy}}{(1,067 R_b)} + 0,05 (\mu_{\text{и}, \%}) + \right. \\ \left. + 0,0035 \frac{L}{h} \right) - \\ - \left(0,6 \frac{x}{h_o} + 0,08 \cdot \rho_{s1} / \rho_{s2} \right) + 0,025 C, \quad (2)$$

где C представляет собой процент коррозии, возникающей в арматурной стали, и определяемый потерей площади поперечного сечения арматуры. Модифицированная модель продемонстрировала высокий уровень точности: среднее значение составляет 1,06; стандартное отклонение — 0,093; абсолютная ошибка — 0,066.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование коэффициента перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках при изгибном нагружении как с коррозией, так и без нее. В ходе исследования получено несколько значимых результатов:

1. Применяемый ускоренный метод коррозии оказался эффективным, контролирующим изменение значений коэффициента перераспределения мо-

ментов путем воздействия на различные зоны и уровни коррозии внутри балок.

2. С увеличением уровня коррозии коэффициент перераспределения моментов также увеличивался. Особенно заметно, что в случае 30%-ной коррозии, затрагивающей арматуру в области среднего пролета, коэффициент перераспределения моментов достигал своего максимального значения 46 %, что является значительным увеличением по сравнению с 14%-ной у некорродированных балок. Это подчеркивает глубокое влияние коррозии на поведение перераспределения моментов в железобетонных балках.

3. Новая модифицированная модель, учитывающая влияние коррозии, продемонстрировала способность точно предсказывать экспериментальные результаты. Она достигла средней абсолютной ошибки 0,066, что подчеркивает ее эффективность в улавливании сложного взаимодействия между коррозией и перераспределением моментов в железобетонных балках.

Эти результаты свидетельствуют о важности учета влияния коррозии при оценке поведения изгибаемых железобетонных конструкций. Полученные результаты вносят ценный вклад в область строительной инженерии, способствуя разработке более точных прогностических моделей и стратегий для решения проблем, связанных с коррозией в железобетонных балках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6 (53). С. 98–105. EDN VAVKYX.
2. Истомин А.Д., Кудрявцев А.В. Работа статически неопределимых железобетонных элементов в условиях отрицательных температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 51–55. EDN WHKJVP.
3. Дудина И.В., Тамразян А.Г. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления // Жилищное строительство. 2001. № 3. С. 8–10. EDN UIZQDH.
4. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 715–720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231
5. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Влияние коррозии на поведение железобетонных балок // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междуна. академических чтений. 2021. С. 241–249. EDN ZFMGQV.
6. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams // Magazine of Concrete Research. 2005. Vol. 57. Issue 1. Pp. 9–20. DOI: 10.1680/macr.57.1.9.57870
7. Тамразян А.Г., Рашидов Б.Т. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2018. № 6 (80). С. 14–21. EDN YSXCPB.
8. Кальницкий А.А. Расчет статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий. М. : Стройиздат, 1970. 168 с.
9. Черняева Р.П.К. определению границ перераспределения усилий при расчете статически неопределимых железобетонных балок по методу предельного равновесия // Строительство и реконструкция. 2014. № 1 (51). С. 41–45. EDN SQMATT.
10. Zhu W., François R. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 51. Pp. 461–472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.015
11. Huang R., Yang C.C. Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion // Cement and Concrete Composites. 1997. Vol. 19. Issue 2. Pp. 131–137. DOI: 10.1016/S0958-9465(96)00050-9

12. Dang V.H., François R. Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour of RC beam // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 48. Pp. 558–568. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.09.021

13. Du Y., Clark L.A., Chan A.H.C. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams // *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. Issue 3. DOI: 10.14359/18618

14. Zhang W., Zhang H., Gu X., Liu W. Structural behavior of corroded reinforced concrete beams under sustained loading // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 174. Pp. 675–683. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.145

15. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in concrete // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. P. 111392. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111392

16. Zhang R., Castel A., François R. Serviceability limit state criteria based on steel–concrete bond loss for corroded reinforced concrete in chloride environment // *Materials and structures*. 2009. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1407–1421. DOI: 10.1617/s11527-008-9460-0

17. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Параметры, влияющие на перераспределение моментов в статически не-

определимых железобетонных балках // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 6. С. 4–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.04-11. EDN GQJOZL.

18. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2023. Vol. 27. Issue 4. Pp. 1503–1511. DOI: 10.1080/19648189.2022.2086179

19. Fernandez I., Herrador M.F., Marí A.R., Bairán J.M. Ultimate capacity of corroded statically indeterminate reinforced concrete members // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-018-0297-9

20. Feng R., Liu Y., Zhu J.H., Xing F. Flexural behaviour of C-FRCM strengthened corroded RC continuous beams // *Composite Structures*. 2020. Vol. 245. P. 112200. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112200

21. Xia J., Jin W., Li L. Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. Issue 5. Pp. 1794–1805. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.01.058

22. Shen J., Gao X., Li B., Du K., Jin R., Chen W. et al. Damage evolution of RC beams under simultaneous reinforcement corrosion and sustained load // *Materials*. 2019. Vol. 12. Issue 4. P. 627. DOI: 10.3390/ma12040627

Поступила в редакцию 12 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 19 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Ашот Георгиевич Тамразян — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 447901, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

Йехия Ахмед Котп Сайед — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1103250, Scopus: 58170730800, ResearcherID: HTR-8755-2023, ORCID: 0000-0003-3969-8111; engyehia250@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Stress-strain state of concrete bending elements with cracks. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 6(53):98-105. EDN VAVKYX. (rus.).

2. Istomin A.D., Kudryavtsev A.V. Behavior of statically indeterminate reinforced concrete members under negative temperatures. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:51-55. EDN WHKJVP. (rus.).

3. Dudina I.V., Tamrazyan A.G. Providing the quality of prefabricated ferroconcrete structures on the production stage. *Housing Construction*. 2001; 3:8-10. EDN UIZQDH. (rus.).

4. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures. *Procedia Engineering*. 2016; 153:715-720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231

5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Influence of corrosion on the behavior of reinforced concrete beams. Safety of the Construction Fund of Russia. *Problems and Solutions : materials of the International Academic Readings*. 2021; 241-249. EDN ZFMGQV. (rus.).

6. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams. *Magazine of Concrete Research*. 2005;

57(1):9-20. DOI: 10.1680/mac.57.1.9.57870

7. Tamrazyan A.G., Rashidov B.T. To the level of redistribution of moments in statically uncertain reinforced concrete beams. *Building and Reconstruction*. 2018; 6(80):14-21. EDN YSXCPB. (rus.).

8. Kal'nitskiy A.A. *Calculation of statically indefinable reinforced concrete structures, taking into account the redistribution of forces*. Moscow, 1970; 168. (rus.).

9. Chernyaeva R. To delimitation of redistribution of efforts at calculation of statically indefinable ferroconcrete beams on a method of limit balance. *Building and Reconstruction*. 2014; 1(51):41-45. EDN SQMATT. (rus.).

10. Zhu W., François R. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam. *Construction and Building Materials*. 2014; 51:461-472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.015

11. Huang R., Yang C.C. Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Composites*. 1997; 19(2):131-137. DOI: 10.1016/s0958-9465(96)00050-9

12. Dang V.H., François R. Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour of RC beam. *Engineering Structures*. 2013; 48:558-568. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.09.021

13. Du Y., Clark L.A., Chan A.H.C. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2007; 104(3). DOI: 10.14359/18618

14. Zhang W., Zhang H., Gu X., Liu W. Structural behavior of corroded reinforced concrete beams under sustained loading. *Construction and Building Materials*. 2018; 174:675-683. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.145

15. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in

concrete. *Engineering Structures*. 2021; 226:111392. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111392

16. Zhang R., Castel A., François R. Serviceability limit state criteria based on steel-concrete bond loss for corroded reinforced concrete in chloride environment. *Materials and Structures*. 2009; 42(10):1407-1421. DOI: 10.1617/s11527-008-9460-0

17. Tamrazyan A.G., Sayed Ye.A.K. Parameters affected the moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 6:4-11. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.04-11. EDN GQJOZL. (rus.).

18. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2023; 27(4):1503-1511. DOI: 10.1080/19648189.2022.2086179

19. Fernandez I., Herrador M.F., Marí A.R., Bairán J.M. Ultimate capacity of corroded statically indeterminate reinforced concrete members. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018; 12(1). DOI: 10.1186/s40069-018-0297-9

20. Feng R., Liu Y., Zhu J.H., Xing F. Flexural behaviour of C-FRCM strengthened corroded RC continuous beams. *Composite Structures*. 2020; 245:112200. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112200

21. Xia J., Jin W., Li L. Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment. *Corrosion Science*. 2011; 53(5):1794-1805. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.01.058

22. Shen J., Gao X., Li B., Du K., Jin R., Chen W. et al. Damage evolution of RC beams under simultaneous reinforcement corrosion and sustained load. *Materials*. 2019; 12(4):627. DOI: 10.3390/ma12040627

Received November 12, 2023.

Adopted in revised form on November 19, 2023.

Approved for publication on December 14, 2023.

B I O N O T E S: **Ashot G. Tamrazyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 447901, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

Yehia Ahmed Kotp Sayed — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1103250, Scopus: 58170730800, ResearcherID: HTR-8755-2023, ORCID: 0000-0003-3969-8111; engyehia250@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона

Тамара Николаевна Черных, Кирилл Алексеевич Горбачевских,
Михаил Владимирович Кriuшин, Александр Анатольевич Орлов,
Мария Владимировна Комелькова, Павел Олегович Платковский

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(ЮУрГУ (НИУ)); г. Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены причины снижения долговечности изгибаемых конструкций через призму нарушения защитного слоя арматуры, который в первую очередь нарушается при образовании трещин. Трещины могут самозалечиваться различными методами, наиболее эффективным из которых является микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция.

Материалы и методы. Использованы штаммы *Bacillus subtilis* VKM B-70 и VKM B-501 (всероссийская коллекция микроорганизмов), микрокремнезем, метакраин, золу уноса. Оценка выживаемости бактерий проведена путем культивирования бактериальных штаммов из образцов-таблеток. Определение pH образцов выполнено с помощью pH-метра. Оценка скорости зарастания трещин осуществлена путем визуального осмотра образцов-таблеток под оптическим микроскопом.

Результаты. Приведены результаты эксперимента по подбору оптимального размера альгинатных бактериальных гранул для биоминеральной добавки. Изучено влияние биоминеральных добавок различного состава на зарастание трещин шириной от 100 до 500 мкм. Показано эффект повышения активности бактерий в присутствии пуццоланового компонента, выявлена связь щелочности среды образца и активности бактерий.

Выводы. Рекомендуемым диаметром гранул с точки зрения обеспечения прочности, вероятности залечивания трещин и технологических причин является диапазон 1–1,8 мм. Активность бактерий в таких гранулах увеличивается при наличии в составе добавки пуццоланового компонента. Зола уноса по сравнению с другими видами пуццолановых добавок наиболее эффективна в составах с бактериями *Bacillus subtilis* из-за способности снижать щелочность цементно-песчаных композиций, создавая более благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий. При использовании комплексных биоминеральных добавок происходит значительное увеличение скорости зарастания трещин, что позволяет обеспечить закрытие трещин шириной 100 мкм всего за 5 циклов «вода – воздух».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Bacillus subtilis*, пуццолановые добавки, самовосстановление, самозалечивание, трещины, бетон, раствор

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований № FENU-2023-0012 (2023012ГЗ)).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Черных Т.Н., Горбачевских К.А., Кriuшин М.В., Орлов А.А., Комелькова М.В., Платковский П.О. Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 569–579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579

Автор, ответственный за переписку: Тамара Николаевна Черных, chernykh@yus.ru.

Biomaterial additives for self-healing of concrete

Tamara N. Chernykh, Kirill A. Gorbachevskykh, Mikhail V. Kriuшин,
Aleksander A. Orlov, Maria V. Komelkova, Pavel O. Platkovskii

South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU)); Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The reasons for the reduction of durability of flexural structures due to the violation of the protective layer of reinforcement are considered. It breaks down when cracks form. Cracks can self-heal by various methods, the most effective of which is microbial-induced precipitation of calcium carbonate.

Materials and methods. *Bacillus subtilis* strains VKM B-70 and VKM B-501 (All-Russian Collection of Microorganisms), microsilica, metakaolin, and fly ash were used. Bacterial activity was assessed by culturing bacterial strains from tablet specimens. The pH of the specimens was determined using the pH meter. The crack growth rate was assessed by visual inspection of the tablet specimens by the optical microscope.

Results. The results of the experiment on selection of optimal size of alginate bacterial granules for biomaterial additives are shown. The effect of biomaterial additives of various compositions on the overgrowth of cracks with a width of 100 to 500 μm

was studied. The effect of increasing bacterial activity in the presence of the pozzolanic component is shown. The relationship between the alkalinity of the specimen medium and bacterial activity was revealed.

Conclusions. The recommended granule diameter is 1–1.8 mm. The bacterial activity in such granules increases in the presence of pozzolanic component in the composition of the additive. Fly ash was most effective in formulations with *Bacillus subtilis* bacteria due to its ability to lower the pH of cement-sand compositions. By lowering the pH, conditions that are more favourable are created for the vital activity of bacteria. When using complex biomineral additives, there is a significant increase in the rate of crack healing, which will allow self-healing of cracks with a width of 100 microns in just five water-air cycles.

KEYWORDS: *Bacillus subtilis*, pozzolanic additives, self-healing, cracks, concrete, mortar

Acknowledgements. The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment for Basic Research No. FENU-2023-0012 (2023012Г3)).

FOR CITATION: Chernykh T.N., Gorbachevskykh K.A., Kriushin M.V., Orlov A.A., Komelkova M.V., Platkovskii P.O. Biomineral additives for self-healing of concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579 (rus.).

Corresponding author: Tamara N. Chernykh, chernykh@susu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

К железобетону современных уникальных зданий и сооружений, срок службы которых составляет 100 и более лет, предъявляются высокие требования по долговечности. Трещинообразование — одна из основных проблем снижения долговечности железобетона. К образованию трещин могут привести усадочные явления; технологические ошибки при изготовлении и укладке бетонной смеси; физические воздействия при эксплуатации, превышающие расчетные значения. Причиной снижения долговечности при трещинообразовании является не столько потеря прочности бетоном, сколько нарушение защитного слоя арматуры. Зачастую ремонт и восстановление железобетонных конструкций приводят к большим затратам материальных и трудовых ресурсов, а иногда и невозможны. В таких ситуациях самозалечивание трещин бетона — реальная возможность продлить срок службы конструкций. Для реализации процесса самозалечивания в настоящее время учеными предложено несколько оптимальных методов искусственного самовосстановления: с использованием полимеров с эффектом памяти, инкапсулированных питательных веществ, питательной сети и микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция [1, 2]. Кроме того, цементные материалы склонны к самозалечиванию трещин. Материалы на основе цемента обладают способностью к самовосстановлению, что позволяет им герметизировать и заживлять микротрещины вследствие остаточного ресурса портландцемента и процессов карбонизации портландита [3–6].

Наиболее эффективным способом искусственного самовосстановления на сегодняшний день считается микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция. Это естественный биологический процесс, при котором микробы производят неорганические материалы в рамках своей основной метаболической активности. Данная технология широко изучена [6–12] и перспективна в направлении внедрения самовосстанавливающихся бетонов в практику. Однако для надежного протекания самовос-

становления необходимо создать определенные условия.

1. Источник самозалечивания должен быть готов к распространению или находиться в трещине, при растрескивании он должен активизироваться, поэтому чаще всего микробный агент вводят в виде капсул [13–16], способных разрушаться при прохождении через них трещины, например, используют гранулы на основе отвержденного альгината кальция [17].

2. После разрушения капсулы к аэробным бактериям должны начать поступать воздух и влага с растворенными питательными веществами, заранее введенными в бетон, благодаря чему они активизируются и запускают процессы жизнедеятельности [18]. Весь процесс самозалечивания должен проходить в диапазоне условий эксплуатации, достаточном для полного залечивания трещин. С этой точки зрения наиболее эффективно использовать эффект самозалечивания в конструкциях, подвергающихся хотя бы периодическому увлажнению, или работающих во влажном воздухе, так как вода служит проводником питательных веществ для бактерий.

3. До трещинообразования источнику самозалечивания необходимо сохранять способность к активизации в течение всего срока службы конструкции, поэтому следует применять штаммы бактерий, способные долгое время находиться в состоянии спор, не погибая, и максимально активизироваться при трещинообразовании.

Известно, что биодобавки из бактерий вида *Bacillus subtilis* [19, 7] могут залечивать трещины, возникающие в строительных конструкциях под действием нагрузок или агрессивной окружающей среды. Бактерии *Bacillus subtilis* при наличии кальцийсодержащего питательного вещества, например лактата кальция, в процессе жизнедеятельности выделяют карбонат кальция (кальцит) [20, 21], который кристаллизуется в трещинах и постепенно заполняет их, восстанавливая сплошность строительных материалов [22].

Согласно биологической характеристике штамма *Bacillus subtilis*¹, активный рост бактерий происходит при pH от 4,5 до 8,0. При этом обычные цементные бетоны, растворы и сухие строительные смеси имеют pH не менее 11,5 [23]. В связи с чем эффективность залечивания трещин без учета уровня pH среды значительно снижается и не может достоверно прогнозироваться, поскольку обычно уровень pH цементных материалов является неблагоприятным для деятельности бактерий.

Цель исследования — создание концепции биоминеральных добавок для самовосстанавливающегося бетона на основе бактерий *Bacillus subtilis* и оценка его способности к самозалечиванию трещин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве биоактивного компонента добавки использовали штаммы *Bacillus subtilis* VKM B-70 и VKM B-501 (всероссийская коллекция микроорганизмов), способные осаждать кальцит. В качестве питательной среды для выращивания штамма применяли универсальный стерильный жидкий мясо-пептонный бульон. Штаммы *Bacillus subtilis* высевали на питательную бульонную среду, а после достижения максимума (10^8 КОЕ/мл) бактериальный бульон использовали для изготовления гранул.

Для получения гранул сначала смешивали бульон с различным количеством альгината натрия до полного усреднения, что позволяло регулировать вязкость жидкости. Полученную жидкость медленно закачивали в иглу шприца с помощью перистальтического насоса, который затем доставлял капли размером 0,8–3,2 мм в емкость с 2 %-ным раствором хлорида кальция, поставленную на магнитную мешалку, с образованием отвержденных по поверхности гранул. Готовые гранулы подсушивали в течение 30 мин на воздухе и окатывали в смеси порошкообразных компонентов: пуццолана и лактата кальция.

Использовали пуццолановые добавки трех видов: микрокремнезем (МК-85, (побочный продукт производства ферросилиция Челябинского электрометаллургического завода)), метакаолин (МТК, произведен из природного каолина месторождения Журавлиный Лог), зола уноса (ЗУ, продукт от сжигания каменного угля на Рефтинской ГРЭС).

Соотношения компонентов в добавках, полученные в ходе предварительного эксперимента, составляли: гранулы:метакаолин 2:1, гранулы:микрокремнезем 1:1 и гранулы:зола уноса 1:4. Выбор соотношения гранулы:пуццолан проводили на уровне предварительного эксперимента по эффективности самозалечивания образцов без бактерий. Лактат

кальция, который служит питательным веществом для бактерий и источником кальция для залечивающего агента, вводили в количестве 15 % от массы гранул.

Для эксперимента использовали портландцемент ЦЕМ 42,5Н без добавок, изготовленный из клинкера 96,5 % и двуводного сульфата кальция в виде природного гипса 3,5 %.

Готовили смесь цемента и стандартного полифракционного песка в соотношении портландцемент:песок 1:3, к которой добавляли биоминеральную добавку. Смесь тщательно перемешивали всухую, затем с водой при одинаковом водоцементном отношении 0,4.

Из полученной смеси изготавливали образцы различных размеров:

- образцы-таблетки диаметром 10 мм и толщиной 5 мм, которые 28 сут твердели при нормальных условиях, после чего в них искусственно создавали трещину, прикладывая с двух сторон сжимающие нагрузки с помощью тисков; образцы с шириной трещины менее 100 и более 500 мкм отбраковывали (рис. 1);
- образцы-балочки размерами 40 × 40 × 160 мм для испытания на прочность, которые до 28 сут твердели при нормальных условиях, образцы испытывали разрушением на прочность при изгибе и сжатии в возрасте 28 сут.

Образцы-таблетки после образования трещины фиксировали на предметном стекле с помощью водостойкого клея, затем образцы твердели циклически (12 ч в воде, после чего 12 ч на воздухе при относительной влажности воздуха 60 % ± 2 °).

Оценку выживаемости бактерий выполняли путем культивирования бактериальных штаммов из образцов-таблеток. 1 г растертого до прохождения через сито с ячейкой 0,08 мм образца-таблетки смешивали с 10 мл физраствора. Для определения общей бактериальной обсемененности (общего микробного числа) жидкость с порошком взбалтывали и сразу отбирали 1,0 см³ с помощью шприца, затем помещали в чашку Петри и заливали расплавленным мясо-пептонным агаром. После

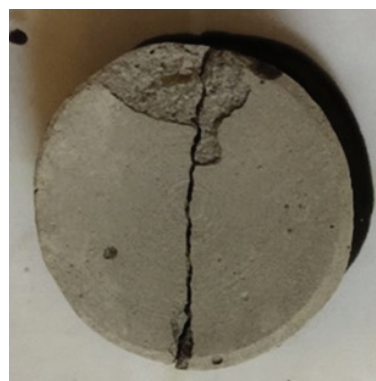


Рис. 1. Образец-таблетка с заложенной трещиной

Fig. 1. Specimen tablet with embedded crack

¹ МУК 4.2.2770–10. Метод микробиологического измерения концентрации клеток микроорганизма. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 20 с.

застывания среды чашки с посевами вверх дном помещали в термостат при температуре 37 °С. Подсчет выросших колоний производили через 72 ч. Количество колоний, выросших на чашке, умножали на 10 для определения общего количества колониеобразующих единиц (КОЕ) на 1 г образца-таблетки (МР 4.2.0220–20). Общее микробное число на 1 г образца-таблетки равно среднему количеству КОЕ на 1 г образца-таблетки. Бактериальную культуру идентифицировали визуально по морфологическим свойствам, а также по микроскопическим свойствам путем изучения мазков методом иммерсионной микроскопии, для чего приготавливали препараты фиксированных клеток на предметных стеклах, после фиксации препараты окрашивали метиленовым синим, по Граму и методом Ожешко для спорообразующих культур.

Определение рН образцов проводили с помощью рН-метра testo 206, точность измерения ±0,02 рН.

Оценку скорости зарастания трещин осуществляли с помощью визуального осмотра образцов-таблеток под оптическим микроскопом ММН-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для регулирования размера капли и, соответственно, размера отвержденной гранулы использовали различное количество альгината натрия. При увеличении концентрации альгината натрия гранулы получаются закономерно большего диаметра (рис. 2, 3).

Чем меньше гранула, тем выше вероятность ее нахождения на пути образующейся трещины, поэтому нужно стремиться к уменьшению размера гранул. Для оценки влияния введения гранул на прочность цементно-песчаных композиций провели эксперимент на образцах с содержанием гранул 1 %, соответствующих вероятности их нахождения на пути трещины (рассчитано математически при идеально равномерном распределении), прочности при сжатии и изгибе приведены в табл. 1.

По результатам табл. 1 видно, что введение альгинатных гранул в состав цементно-песчаной смеси приводит к снижению прочности, при этом прочность при сжатии образцов с гранулами диаметром до 1,81 мм изменяется незначительно, а при повышении диаметра начинает существенно снижать-

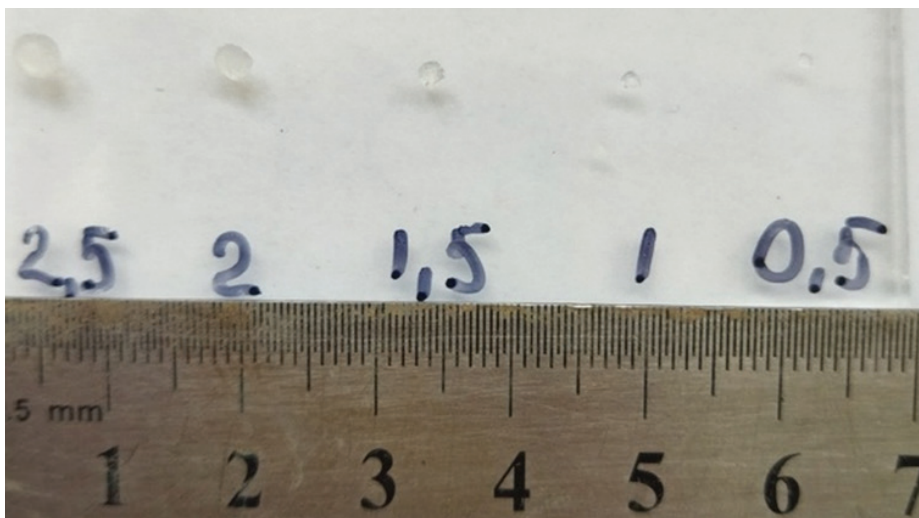


Рис. 2. Внешний вид гранул при различном количестве альгината натрия в бактериальном бульоне

Fig. 2. Photo of granules with different amounts of sodium alginate in bacterial broth

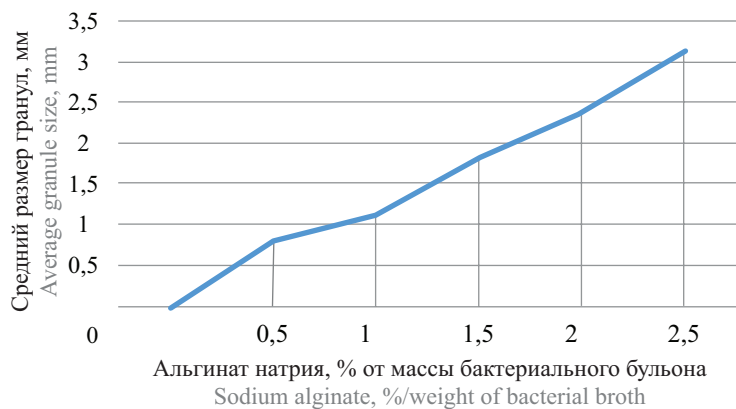


Рис. 3. Изменение размера гранул в зависимости от количества альгината натрия в бактериальном бульоне

Fig. 3. Change in the size of granules depending on the amount of sodium alginate in the bacterial broth

Табл. 1. Прочность цементно-песчаных образцов в зависимости от размера гранул**Table 1.** The strength of cement-sand specimens depending on the size of granules

Альгинат натрия, % от массы бактериального бульона Sodium alginate, % weight of bacterial broth	Средний размер гранул, мм Average granule size, mm	Вероятность нахождения гранулы на пути трещины, % Probability to be a granule on the crack path, %	Прочность при изгибе, МПа Bending strength, MPa	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa
–	–	0	5,4	54,6
0,5	0,81	100,00	5,2	50,0
1	1,12	100,00	4,9	50,1
1,5	1,81	100,00	4,8	50,0
2	2,37	88,08	4,6	47,4
2,5	3,14	71,51	4,8	46,2

ся, что, вероятно, связано с тем, что крупные гранулы, не имея собственной прочности, выступают значимыми концентраторами напряжений. Также при ограничении диаметра гранулы 1,8 мм можно обеспечить наличие гранулы в трещине с максимальной вероятностью. С другой стороны, технологически удобно получать гранулы диаметром не менее 1 мм, поэтому рекомендуемым диапазоном диаметров гранул является 1,0–1,8 мм.

Оценку активности бактерий в среде цементно-песчаных композиций проводили на образцах-таблетках в 90 сут их твердения при различных дозировках биоминеральных добавок, так чтобы дозировка гранул диаметром 1–1,5 мм без порошкообразных веществ составляла 5 %. Результаты, представленные в табл. 2, показывают корреляцию между рН среды образца, заданного пуццоланом, и количеством колоний (общим микробным числом).

Штамм ВКМ-501 показал меньшую активность в среде цементно-песчаных образцов. При этом для обоих штаммов даже небольшое уменьшение рН-образцов приводило к более активному росту бактерий. Как видно по результатам оценки обще-

го микробного числа, с помощью изменения рН-среды пуццолановым компонентом добавки увеличилась активность бактерий, что может увеличить скорость самозалечивания.

Способность к зарастанию трещин устанавливали на образцах-таблетках с биоминеральными добавками, состоящими из бактериальных гранул диаметром 1–1,5 мм с бактериями более активного штамма ВКМ-70, лактата кальция и пуццолана, а также для сравнения на добавках того же состава, но без бактериальных гранул. Фотографии трещин в процессе зарастания приведены на рис. 4. Средняя скорость закрытия трещин представлена в табл. 3.

В результате эксперимента установлено значительное увеличение скорости зарастания трещин при использовании комплексных биоминеральных добавок, что позволит обеспечить закрытие трещин шириной 0,1 мм всего за 5 циклов «вода – воздух», что хорошо укладывается в разные климатические условия РФ, кроме вечной мерзлоты. Увеличение скорости закрытия трещин, вероятно, связано с установленным ранее повышением активности бактерий в присутствии пуццолановых добавок.

Табл. 2. Оценка среднего количества колоний бактерий (общего микробного числа) в среде цементно-песчаных композиций в возрасте 90 суток**Table 2.** Estimation of the average number of bacterial colonies (total microbial number) in the medium of cement-sand compositions at the age of 90 days

Вид пуццолана в составе биоминеральной добавки Type of pozzolan in biomineral additive	РН образца-таблетки PH tablet specimen	Общее микробное число на 1 г образца-таблетки Total bacteria count (TBC) in 1 g tablet specimen	
		ВКМ-70 VKM-70	ВКМ-501 VKM-501
Без пуццолана Without pozzolan	11,00	100	30
МК-85 Microsilica	10,95	110	40
МТК Metakaolin	10,65	110	50
ЗУ Fly ash	10,50	150	70

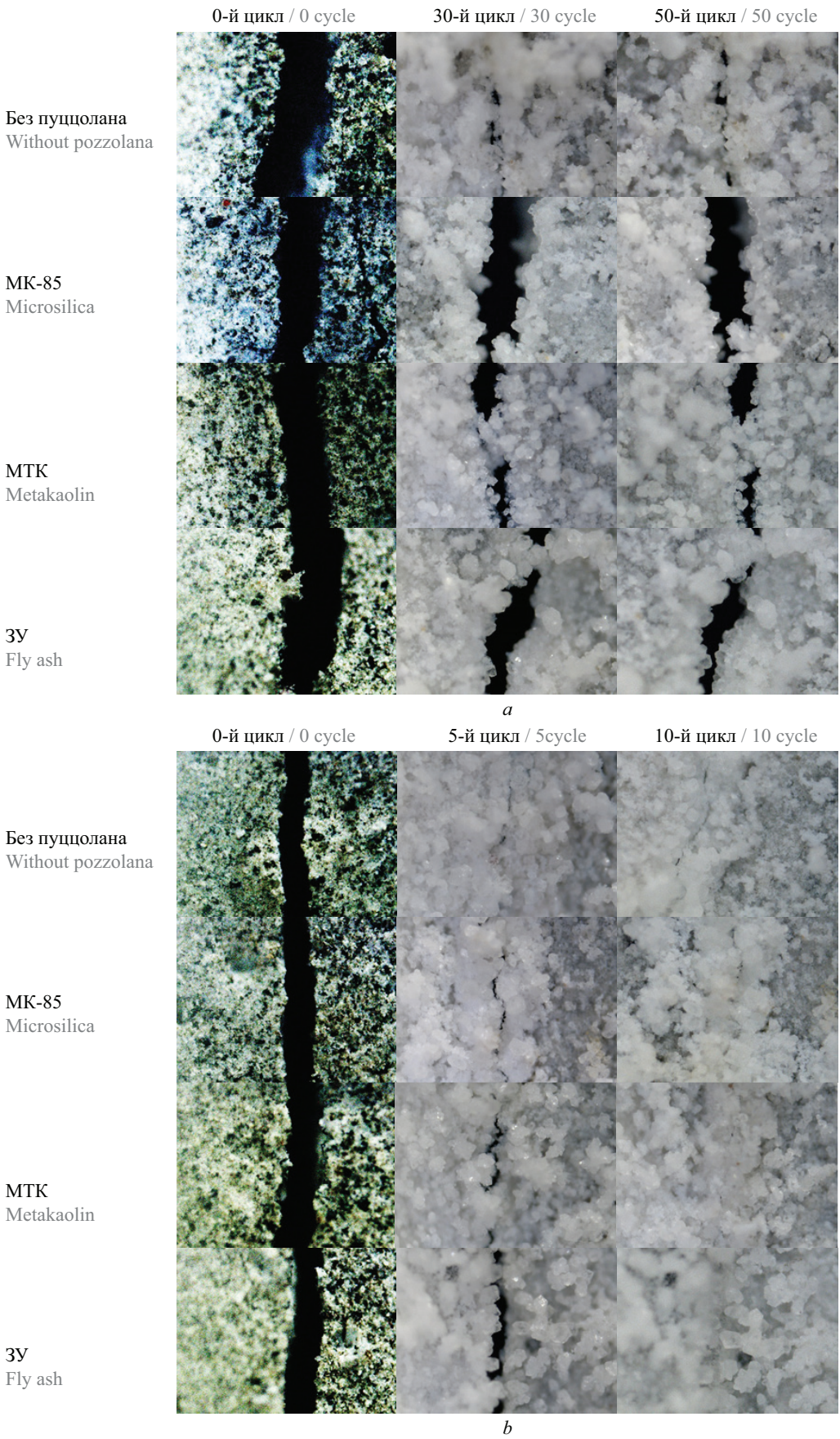


Рис. 4. Фотографии зарастания трещин в образцах-таблетках: а — без бактериальных гранул; b — с бактериальными гранулами

Fig. 4. Photographs of crack healing in tablet samples: a — without bacterial granules; b — with bacterial granules

Табл. 3. Параметры зарастания трещин
Table 3. Parameters of crack healing

Состав добавки Additive composition	Средние ширины трещин в образцах-таблетках, мкм Average crack widths in tablet specimens, μm			Количество циклов, при котором закрылась самая тонкая трещина Number of cycles at which the thinnest crack closed	Средняя скорость закрытия трещин, мкм/цикл Average crack closing speed, μm/cycle
Без бактериальных гранул Without bacterial granules					
Без пуццоланов Without pozzolan	214	266	295	60	3,6
МК-85 Microsilica	162	190	190	70	2,3
МТК Metakaolin	181	195	214	70	2,4
ЗУ Fly ash	143	167	233	65	2,6
С бактериальными гранулами With bacterial granules					
Без пуццоланов Without pozzolan	102	119	124	11	8,8
МК-85 Microsilica	128	143	147	10	11,9
МТК Metakaolin	152	167	171	9	16,9
ЗУ Fly ash	119	133	143	5	22,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самозалечивание трещин в цементно-песчаных композициях, содержащих биоминеральные добавки на основе пуццоланов, бактерий вида *Bacillus subtilis* и лактата кальция, исследовали путем оценки уменьшения ширины трещин исходной ширины 100–500 мкм. В процессе разработки добавки установлено, что увеличение диаметра бактериальных альгинатных гранул свыше 1,8 мм приводит к снижению прочности цементно-песчаных образцов и уменьшению вероятности нахождения гранулы в трещине при дозировке 1 %, технологически удобным является размер не менее 1 мм, поэтому

рекомендуемый диапазон — 1–1,8 мм. Активность бактерий в таких гранулах увеличивается при наличии в составе добавки пуццоланового компонента. Зола уноса по сравнению с другими видами пуццолановых добавок была наиболее эффективной в составах с бактериями *Bacillus subtilis* из-за способности снижать щелочность цементно-песчаных композиций, создавая более благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий. Использование комплексных биоминеральных добавок для регулирования скорости залечивания трещин в цементных композициях представляется перспективным направлением развития области самозалечивания трещин бетонов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aytekin B., Mardani A., Yazıcı Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 378. P. 131198. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131198

2. De Rooij M., Van Tittelboom K., De Belie N., Schlangen E. Self-healing phenomena in cement-based materials // RILEM State-of-the-Art Reports. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2

3. Termkhajornkit P., Nawa T., Yamashiro Y., Saito T. Self-healing ability of fly ash–cement systems // Cement and Concrete Composites. 2009. Vol. 31. Issue 3. Pp. 195–203. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.009

4. Ter Heide N. Crack healing in hydrating concrete. Delft University of Technology, 2005.

5. Mamo G., Mattiasson B. Alkaliphiles: the emerging biological tools enhancing concrete durability // Alkaliphiles in Biotechnology. 2019. Pp. 293–342. DOI: 10.1007/10_2019_94

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 4, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 4, 2024

6. Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Салман А.Д.С.Д., Смирнов В.Ф., Фомищев В.Т. Технология самовосстановления железобетонных конструкций с помощью микроорганизмов // Русский инженер. 2018. № 4 (61). С. 46–48. EDN YOOLYD.
7. Jonkers H.M., Thijssen A., van Breugel K. Bacteria mediated remediation of concrete structures // Proceedings of the second international symposium on service life design for infrastructures. 2010. Pp. 833–840.
8. Dhami N.K., Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications : a review // Frontiers in Microbiology. 2013. No. 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314
9. Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal C. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Issue 10. Pp. 1980–1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005
10. Ghosh S., Biswas M., Chattopadhyay B.D., Mandal S. Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar // Cement and Concrete Composites. 2009. Vol. 31. Issue 2. Pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001
11. Biswas M., Majumdar S., Chowdhury T., Chattopadhyay B., Mandal S., Halder U. et al. Bioremediase a unique protein from a novel bacterium BKH1, ushering a new hope in concrete technology // Enzyme and Microbial Technology. 2010. Vol. 46. Issue 7. Pp. 581–587. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2010.03.005
12. Строчкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каме-нецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103. EDN JCENZK.
13. Wang J.Y., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 68. Pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018
14. Seifan M., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nano-biotechnological approach // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2018. Vol. 42. Issue 1. Pp. 37–46. DOI: 10.1007/s00449-018-2011-3
15. Seifan M., Sarmah A.K., Samani A.K., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles // Applied Microbiology and Biotechnology. 2018. Vol. 102. Issue 10. Pp. 4489–4498. DOI: 10.1007/s00253-018-8913-9
16. Иноземцев С.С., До Т.Ч. Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 10. С. 1407–1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424
17. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores // Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 56. Pp. 139–152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009
18. Nielsen S.D., Koren K., Löbmann K., Hinge M., Scoma A., Kjeldsen K.U. et al. Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria // Applied Microbiology and Biotechnology. 2019. Vol. 104. Issue 1. Pp. 365–375. DOI: 10.1007/s00253-019-10215-4
19. Аль Дулайми С.Д.С. Самовосстанавливающие бетоны, модифицированные микробиологической добавкой : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 310 с. EDN OVDXMN.
20. Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P. Bacillus Subtilis Bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength // International Research Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 3. Issue 5. Pp. 1229–1234.
21. De Leeuw N.H., Parker S.C. Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: an atomistic approach // The Journal of Physical Chemistry B. 1998. Vol. 102. Issue 16. Pp. 2914–2922. DOI: 10.1021/jp973210f
22. Jongvivatsakul P., Janprasit K., Nuaklong P., Pungrasmi W., Likitlersuang S. Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 212. Pp. 737–744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035
23. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Чернякевич О.Ю., Степанова А.В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных коррозионных воздействиях : в 2 ч. Минск : БНТУ, 2016. 204 с. EDN RCHYRK.

Поступила в редакцию 17 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 6 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Тамара Николаевна Черных** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 4731125, Scopus: 6508381737, ResearcherID: K-8568-2014, ORCID: 0000-0002-4288-2115; chernykhnt@susu.ru;

Кирилл Алексеевич Горбачевских — студент Архитектурно-строительного института; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; kirill38964@gmail.com;

Михаил Владимирович Кriuшин — младший научный сотрудник кафедры строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1147146, ResearcherID: AGU 7556-2022, ORCID: 0000-0002-6425-4531; kriushinmv@susu.ru;

Александр Анатольевич Орлов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; SPIN-код: 3296-8955, Scopus: 56486973500, ResearcherID: K-8880-2014, ORCID: 0000-0002-4505-1587; orlovaa@susu.ru;

Мария Владимировна Комелькова — доктор биологических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-образовательного Российско-Китайского центра системной патологии; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 821160, Scopus: 57188550625, ResearcherID: M-6294-2016, ORCID: 0000-0003-2431-8358; komelkovamv@susu.ru;

Павел Олегович Платковский — лаборант Научно-образовательного Российско-Китайского центра системной патологии; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 934627, Scopus: 57197762232, ORCID: 0000-0002-9403-3481; paw.platkovski@yandex.ru.

Вклад авторов:

Черных Т.Н. — научное руководство, концепция исследования, написание статьи, научное редактирование текста.

Горбачевских К.А. — сбор и обработка материала.

Кriuшин М.В. — сбор и обработка материала.

Орлов А.А. — сбор и обработка материала.

Комелькова М.В. — развитие методологии, сбор и обработка материала.

Платковский П.О. — сбор материала, обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aytekin B., Mardani A., Yazıcı Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2023; 378:131198. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131198
2. De Rooij M., Van Tittelboom K., De Belie N., Schlangen E. Self-healing phenomena in cement-based materials. *RILEM State-of-the-Art Reports*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2
3. Termkhajornkit P., Nawa T., Yamashiro Y., Saito T. Self-healing ability of fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31(3):195-203. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.009
4. Ter Heide N. *Crack healing in hydrating concrete*. Delft University of Technology, 2005.
5. Mamo G., Mattiasson B. Alkaliphiles: the emerging biological tools enhancing concrete durability. *Alkaliphiles in Biotechnology*. 2019; 293-342. DOI: 10.1007/10_2019_94
6. Bazhenov Yu.M., Erofeev V.T., Sal-man A.D.S.D., Smirnov V.F., Fomichev V.T. Technology of manufacture and repair of reinforced concrete structures by microorganisms. *Russian Engineer*. 2018; 4(61):46-48. EDN YOOLYD. (rus.).
7. Jonkers H.M., Thijssen A., van Breugel K. Bacteria mediated remediation of concrete structures. *Proceedings of the second international symposium on service life design for infrastructures*. 2010; 833-840.
8. Dhami N.K., Reddy M.S., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications : a review. *Frontiers in Microbiology*. 2013; 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314
9. Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal C. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 2005; 35(10):1980-1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005
10. Ghosh S., Biswas M., Chattopadhyay B.D., Mandal S. Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31(2):93-98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001
11. Biswas M., Majumdar S., Chowdhury T., Chattopadhyay B., Mandal S., Halder U. et al. Bioremediase a unique protein from a novel bacterium BKH1, ushering a new hope in concrete technology. *Enzyme*

and *Microbial Technology*. 2010; 46(7):581-587. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2010.03.005

12. Strokovaya V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies of building materials creation and restoration: analysis of the state and prospects of development. *Construction Materials*. 2019; 9:83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103. EDN JCENZK. (rus.)

13. Wang J.Y., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 68:110-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018

14. Seifan M., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2018; 42(1):37-46. DOI: 10.1007/s00449-018-2011-3

15. Seifan M., Sarmah A.K., Samani A.K., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A. Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018; 102(10):4489-4498. DOI: 10.1007/s00253-018-8913-9

16. Inozemtcev S.S., Toan Trong Do. Technology of self-healing road pavements: current status and development prospects. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(10): 1407-1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424 (rus.).

17. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*. 2014; 56:139-152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009

18. Nielsen S.D., Koren K., Löbmann K., Hinge M., Scoma A., Kjeldsen K.U. et al. Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019; 104(1):365-375. DOI: 10.1007/s00253-019-10215-4

19. Al' Dulaymi S.D.S. *Self-healing concretes modified with a microbiological additive : thesis of candidate of technical science*. Moscow, 2019; 310. EDN OVDXMN. (rus.).

20. Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P. Bacillus Subtilis Bacteria Impregnation in Concrete for Enhancement in Compressive Strength. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016; 3(5):1229-1234.

21. De Leeuw N.H., Parker S.C. Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: An atomistic approach. *The Journal of Physical Chemistry B*. 1998; 102(16):2914-2922. DOI: 10.1021/jp973210f

22. Jongvivatsakul P., Janprasit K., Nuaklong P., Pungrasmi W., Likitlersuang S. Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. *Construction and Building Materials*. 2019; 212:737-744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035

23. Leonovich S.N., Litvinovskiy D.A., Chernyakevich O.Yu., Stepanova A.V. *Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion effects : in 2 parts*. Minsk, BNTU, 2016; 204. EDN RCHYPK. (rus.).

Received September 17, 2023.

Adopted in revised form on September 28, 2023.

Approved for publication on October 6, 2023.

B I O N O T E S : **Tamara N. Chernykh** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 4731125, Scopus: 6508381737, ResearcherID: K-8568-2014, ORCID: 0000-0002-4288-2115; chernykhnt@susu.ru;

Kirill A. Gorbachevskykh — student of the Institute of Architecture and Civil Engineering; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; kirill38964@gmail.com;

Mikhail V. Kriuшин — junior researcher Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 1147146, ResearcherID: AGU 7556-2022, ORCID: 0000-0002-6425-4531; kriushinmv@susu.ru;

Aleksander A. Orlov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; SPIN-code: 3296-8955, Scopus: 56486973500, ResearcherID: K-8880-2014, ORCID: 0000-0002-4505-1587; orlovaa@susu.ru;

Maria V. Komelkova — Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate of the Scientific and Educational Russian-Chinese Center for Systemic Pathology; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 821160, Scopus: 57188550625, ResearcherID: M-6294-2016, ORCID: 0000-0003-2431-8358; komelkovamv@susu.ru;

Pavel O. Platkovskii — laboratory assistant of the Scientific and Educational Russian-Chinese Center for Systemic Pathology; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76, Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 934627, Scopus: 57197762232, ORCID: 0000-0002-9403-3481; paw.platkovski@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Tamara N. Chernykh — scientific management, concept of research, article writing, scientific text editing.

Kirill A. Gorbachevskykh — research, illustrations.

Mikhail V. Kriushin — research, illustrations.

Aleksander A. Orlov — research, illustrations.

Maria V. Komelkova — development of methodology, research.

Pavel O. Platkovskii — research, illustrations.

The authors declare no conflict of interest.

Гипсоцементно-пуццолановые бетоны для аддитивного строительного производства

Равиль Зуфарович Рахимов, Рустем Ханифович Мухаметрахимов,
Альберт Радикович Галаутдинов, Лилия Валиевна Зиганшина
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);
г. Казань, Республика Татарстан, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивное строительное производство (3D-печать), осуществляемое бетонными и растворными смесями на основе минеральных вяжущих, в том числе смешанных, является одним из перспективных способов изготовления строительных изделий, конструкций, возведения зданий и сооружений. Анализ современного состояния исследований в области разработки композиционных материалов на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего для строительной 3D-печати свидетельствует об ограниченности его применения ввиду коротких сроков схватывания гипса, а также низких показателей водостойкости и пределов прочности изделий на его основе, что свидетельствует об актуальности изучения, направленного на разработку стабильных составов гипсоцементно-пуццолановых бетонов (ГЦПБ) для 3D-печати, обладающих высокими физико-техническими и оптимальными реотехнологическими характеристиками.

Материалы и методы. Изготовление образцов осуществлялось на строительном 3D-принтере AMT S-6044 производства ООО «СПЕЦАВИА». Применены стандартные методики исследования реологических свойств смесей и физико-технических свойств бетонов.

Результаты. Научно обоснован и экспериментально определен состав ГЦПБ в технологии аддитивного производства. Обоснована рациональность применения в технологии аддитивного производства бетонов с соотношением вяжущее:заполнитель = 1:2 при модуле крупности песка Мк 3, обеспечивающим следующие характеристики контрольного состава бетона: предел прочности при сжатии 22,1 МПа, при изгибе — 4,9 МПа, средняя плотность — 1892 кг/м³, формоустойчивость — 16 см, предельное напряжение сдвига — 58,5 Па. Изучены особенности структурообразования и ряд недостатков микроструктуры разработанного ГЦПБ, сформированного методом аддитивного производства.

Выводы. Разработаны ГЦПБ для аддитивного строительного производства методом послойной экструзии с оптимальным соотношением компонентов в составе вяжущего. Показана перспективность дальнейшего совершенствования составов ГЦПБ путем их модифицирования полифункциональными комплексными добавками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, аддитивные технологии, 3D-печать, строительные материалы, композиционные материалы, гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, раствор, бетон

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01180 (URL: <https://rscf.ru/project/23-79-01180/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рахимов Р.З., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Гипсоцементно-пуццолановые бетоны для аддитивного строительного производства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 580–595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595

Автор, ответственный за переписку: Рустем Ханифович Мухаметрахимов, muhametrahimov@mail.ru.

Gypsum-cement-puzzolan concrete for 3D CP

Ravil Z. Rakhimov, Rustem Kh. Mukhametrakhimov, Albert R. Galautdinov,
Liliya V. Ziganshina

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE);
Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. 3D concrete printing (3DCP), carried out with concrete and mortar mixtures based on mineral binders, including hybrid mixtures, is one of the promising methods for the concrete products industry. The analysis of the current state of research in the field of development of composite materials based on gypsum-cement-pozzolan binder for 3DCP indicates the limitations of its use due to the short setting time of gypsum, as well as low water resistance and tensile strength of products based on it, which indicates the relevance of research, aimed at developing stable compositions of gypsum-cement-pozzolan concrete for 3DCP, with high physical, technical and optimal rheotechnological characteristics.

Materials and methods. The production of specimens was carried out on construction 3D printer "AMT S-6044" produced by "SPETSAVIA" LLC. Standard methods for studying rheological properties, physical and technical properties of concrete were applied.

Results. The composition of gypsum-cement-pozzolan concrete (GCPC) in 3DCP was theoretically substantiated and experimentally determined. Rational application of concrete with binder: aggregate ratio = 1:2, sand fineness modulus of Mk 3, providing the following characteristics of the control concrete composition: compressive strength — 22.1 MPa, bending strength — 4.9 MPa, average density — 1,892 kg/m³, dimensional stability 16 cm, ultimate shear stress 58.5 Pa was substantiated in 3DCP. The peculiarities of structure formation and some drawbacks of microstructure of the developed gypsum-cement-pozzolan concrete formed by the additive manufacturing method were studied.

Conclusions. Gypsum-cement-pozzolan concretes were developed for 3DCP with an optimal ratio of components in the binder composition. The prospects for further improvement of GCPC compositions by modifying them with multifunctional complex additives were shown.

KEYWORDS: construction, additive technologies, 3DCP, building materials, composite materials, gypsum-cement-pozzolan binder, mortar, concrete

Acknowledgements. The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 23-79-01180 (URL: <https://rscf.ru/en/project/23-79-01180/>).

FOR CITATION: Rakhimov R.Z., Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Gypsum-cement-puzzolan concrete for 3D CP. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):580-595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595 (rus.).

Corresponding author: Rustem Kh. Mukhametrakhimov, mukhametrakhimov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

История развития производства и применения минеральных вяжущих веществ и материалов на их основе с древних времен и до сегодняшнего дня — это история непрерывных поисков путей разработки составов, технологии получения, повышения показателей физико-технических свойств, водостойкости и долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов [1, 2]. Сейчас основным общестроительным вяжущим служит портландцемент (ПЦ) и его разновидности, которые являются «хлебом» строительства и составляют около 80 % общего объема используемых в мире минеральных вяжущих, в том числе и в бетонах для аддитивного строительного производства. Вместе с тем их производство связано с высоким потреблением энергетических ресурсов и значительными объемами загрязняющих окружающую среду выбросов. Производство — крупный источник выделения в окружающую среду: углекислого газа до 1 т, оксидов азота до 9,5 кг, значительного количества пыли на 1 т ПЦ.

Одним из эффективных направлений совершенствования технической, экологической и экономической эффективности аддитивного строительного производства может стать применение бетонов на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ), модифицированных комплексными минеральными и химическими добавками.

Казанская научная школа строительного материаловедения на протяжении многих десятилетий ведет систематические исследования по разработке эффективных модифицированных гипсовых вяжущих (ГВ), растворов и бетонов [3–6]. В настоящей работе приведены результаты исследований и разработок гипсоцементно-пуццолановых бетонов (ГЦПБ) для аддитивного строительного производства.

Аддитивное строительное производство (3D-печать) — один из активно развивающихся и пер-

спективных способов изготовления строительных изделий, конструкций, элементов зданий и сооружений [7–12]. 3D-печать осуществляется бетонными и растворными смесями на основе минеральных вяжущих (портландцемент, гипсовое и смешанные вяжущие). В значительной части исследований рассматриваются бетоны на основе цементного вяжущего [13–16]. Существенно меньшее внимание уделяется композитам на основе гипсовых и смешанных (гипсоцементно-пуццолановых) вяжущих.

Рассматривая гипсовое сырье в составе смесей для 3D-печати, стоит отметить его широкое применение в аддитивных технологиях методом формирования на выровненном слое порошка [17–21]. Выполненный анализ современного состояния исследований в области разработки композиционных материалов на основе ГЦПВ для строительной 3D-печати методом послойной экструзии свидетельствует об ограниченности его применения в данной технологии ввиду коротких сроков схватывания гипса. Среди возможных вариантов использования ГЦПВ в технологии 3D-печати методом послойной экструзии авторами в работах [22–25] предлагается их применение в пенобетонах, обладающих высокой теплоизоляцией, звукопоглощением и огнестойкостью.

Кроме того, широкое применение в строительстве материалов, изделий и конструкций на базе ГВ ограничивается наличием характерных для них недостатков, таких как низкие показатели водостойкости, пределов прочности и морозостойкости. Низкая водостойкость таких материалов и изделий обусловлена высокой растворимостью в воде частиц вяжущего [26, 27], а также возникающими внутренними напряжениями при адсорбции молекул воды поверхностями пустот и каверн в структуре материала с образованием водных пленок, сопровождающимися возникновением расклинивающего эффекта [28].

Ключевым направлением повышения физико-механических свойств и эксплуатационных показате-

телей материалов и изделий на основе ГВ является придание им свойств гидравлических вяжущих путем применения ПЦ совместно с активными минеральными добавками (АМД) [29], что обусловлено формированием водостойких гидратных новообразований и твердеющих в воде композитов при химическом взаимодействии компонентов смешанного вяжущего. А.В. Волженским и А.В. Ферронской разработаны эффективные ГЦПВ, материалы и изделия на основе которого обладают повышенными физико-механическими характеристиками, водостойкостью и морозостойкостью, а также меньшей ползучестью [30]. В исследовании [25] показана эффективность использования тонкоигольчатых и тонковолокнистых кристаллов гидросульфатоалюмината кальция для обеспечения условий формирования самоармированной упрочненной структуры гипсовых композиций.

Изучены физико-технические свойства материалов и изделий на основе ГЦПВ с различным соотношением и видом компонентов в составе вяжущего [29–34]. Эффективность широкого спектра АМД различного происхождения для ГЦПВ, обеспечивающих снижение концентрации оксидов и гидроксидов кальция в жидкой фазе, вступающих в реакцию с активным кремнеземом SiO_2 минеральных добавок, что обуславливает формирование в структуре композита низкоосновных гидросиликатов кальция и повышение его физико-механических свойств, рассмотрена в публикации [34]. Исследованы ГЦПВ на основе гипса марки Г10 (гипс — 65 %, ПЦ — 23 %, АМД — 12 %) [30]. Показано, что в зависимости от вида и гидравлической активности АМД коэффициент размягчения образцов составляет 0,55–0,8. Установлено, что введение в состав ГЦПВ опаловых пород взамен ГВ марки Г10 в количестве 10–30 % при постоянном содержании ПЦ позволяет увеличить водостойкость ГЦПК до 0,64–0,8 [35]. Определена эффективность применения широкого спектра природных и техногенных добавок для ГВ высоких марок, что выражается в увеличении пределов прочности гипсового камня [36]. При этом можно ожидать, что использование в вышеуказанных композициях низкомарочного гипса Г6 не позволит получить материалы и изделия с высокими физико-техническими и эксплуатационными показателями, что подтверждается результатами исследований [30]. Разработаны водостойкие изделия на основе модифицированного комплексной пластифицирующей добавкой ГЦПВ, при этом повышенный коэффициент размягчения достигается за счет высокого содержания ПЦ (не менее 34 % от массы вяжущего) [37, 38]. Известно, что материалы и изделия на основе ГЦПВ при содержании ПЦ в количестве 20–25 % обладают показателями ползучести, сопоставимыми с изделиями на ПЦ, что дает возможность определить минимальное содержание ПЦ в разрабатываемых композициях,

равное 20 %, которое принято для дальнейших экспериментальных исследований.

Одна из важнейших задач при разработке гипсоцементных композиций — обеспечение условий для формирования устойчивых структур при совместных гидратации и твердении гипсового и цементного вяжущих.

В соответствии с исследованиями А.В. Волженского [29–31] разрушение внутренней структуры ГЦПК при его твердении обусловлено кристаллизацией этtringита $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, который образуется с увеличением в объеме в условиях высокой концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе. Снижение концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обеспечивается введением в композицию гидравлических добавок, содержащих активный кремнезем SiO_2 , определяющий формирование низкоосновных гидроалюминатов кальция, гидросиликатов кальция и моносulfатной формы гидросульфатоалюмината кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), не создающих внутренних напряжений в структуре камня. При этом концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе на 5 и 7 сутки должна удовлетворять требованиям¹ [39].

Эффективность АМД в ГЦП системах характеризуется их гидравлической активностью, обуславливающей их способность вступать в химическое взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, снижать его концентрацию в твердеющей системе и обеспечивать гидравлическое твердение ГЦПВ. Таким образом, необходимое содержание АМД в составе ГЦПВ будет зависеть от ее гидравлической активности.

Другими важными особенностями в технологии аддитивного строительного производства мелкозернистыми ГЦПВ, помимо обеспечения устойчивости ГЦП систем, является правильный выбор заполнителя, его крупность, соотношение с вяжущим [40], а также влияние на реотехнологические свойства смесей (подвижность, предельное напряжение сдвига, формоустойчивость) и физико-технические свойства мелкозернистого бетона (МЗБ) [41].

В работе [42] установлено, что введение в состав цементных систем полифракционных наполнителей в количестве 20–40 % от массы ПЦ позволяет обеспечить рациональное соотношение пластичности, структурной прочности и формоустойчивости смесей в технологии 3D-печати. Учитывая тот факт, что ползучесть изделий на основе ГЦПВ, содержащих не менее 20 % цемента, сопоставима с ползучестью изделий на ПЦ, можно ожидать, что полифракционные наполнители будут оказывать аналогичное влияние на изделия на основе разрабатываемого ГЦПВ. Наибольшая прочность характерна для цементных изделий при соотношении Ц/П = 1/1 [43]. Увеличение количества песка в составе смеси до Ц/П = 1:2 приводит к снижению прочности на 14 % при сопоста-

¹ ТУ 21-31-62–89. Гипсоцементнопуццолановое вяжущее. Технические условия. 1990. С. 17.

вимых значениях сроков схватывания, при этом даст возможность существенно сократить расход вяжущего и повысить экономическую целесообразность применения данных составов. Кроме того, в работе показано положительное влияние увеличения содержания песка в составе смеси на реотехнологические характеристики смесей в технологии аддитивного производства.

В рамках исследований [41] показана эффективность фракционирования мелкого заполнителя в составе бетонов на основе композиционного вяжущего при соотношении вяжущее:песок = 1:2 и его положительное влияние на формоустойчивость изделий, что соотносится с трудом [42]. Гипсовое вяжущее вводилось в состав данных бетонов для интенсификации процессов твердения, при этом в ходе исследований установлено его положительное влияние на физико-технические характеристики готовых изделий и показатели формоустойчивости бетонных смесей.

Изучены составы ГЦПБ для 3D-печати, в которых в качестве заполнителя применялся песок с модулем крупности $M_k 2,63$ [44]. Наилучшие результаты достигнуты при соотношении вяжущее:заполнитель = 1:1 и 1:2. Вместе с тем в работе не отражено влияние заполнителя на реологические и физико-технические свойства полученных ГЦПБ.

Предложены составы мелкозернистых бетонов на основе гипсоцементных вяжущих с комплексом химических добавок для эффективной 3D-печати контуров стеновых конструкций [25]. Лучшие показатели по критерию формоустойчивости были достигнуты при соотношении гипсоцементное вяжущее:заполнитель = 1:3–1:4 путем частичной поризации составов (10–15 %). При этом наблюдается закономерное снижение прочностных показателей и водостойкости готовых изделий по сравнению с составом с соотношением компонентов гипсоцементное вяжущее:заполнитель = 1:2. Задача формирования устойчивых структур в разработанных гипсоцементных системах решается преимущественно за счет минеральных добавок (опока, гранулированные шлаки), содержащихся в составе используемого ПЦ. В качестве компонента вяжущего применялся высокопрочный гипс марки Г16, существенно увеличивающий стоимость готовой продукции.

Анализ литературных данных свидетельствует об актуальности исследований, направленных на разработку стабильных составов ГЦПБ для 3D-печати на основе ГЦПВ, обладающих высокими физико-техническими и оптимальными реотехнологическими характеристиками для формования методом послойной экструзии.

Цель настоящей работы заключается в разработке гипсоцементно-пудцолановых бетонов для аддитивного строительного производства.

Объект исследования — гипсоцементно-пудцолановое вяжущее и бетоны на его основе в технологии аддитивного строительного производства.

Предмет исследования — сроки схватывания ГЦПВ, физико-технические характеристики ГЦПБ от вида и содержания АМД, реологические показатели смеси (формоустойчивость, предельное напряжение сдвига) и физико-технические показатели бетона (средняя плотность, пределы прочности при изгибе и сжатии) в зависимости от содержания мелкого заполнителя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись в лаборатории аддитивных технологий строительного производства Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

В качестве исходных материалов для приготовления сырьевой смеси для 3D-печати применялись следующие компоненты, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 59097–2020:

1) цементное вяжущее: ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Сухоложскцемент» по ГОСТ 31108–2020;

2) гипсовое вяжущее: полуводный гипс марки Г6 БП, нормально твердеющий, средней степени помола, производства ООО «Аракчинский гипс» по ГОСТ 125–2018;

3) заполнитель: речной кварцевый песок с модулем крупности $M_k 1,2; 1,9; 2,4, 3$ по ГОСТ 8736–2014;

4) активные минеральные добавки:

- биокремнезем производства ООО «Диамикс» по СТО 23998461-020–2018. Насыпная плотность — 403 кг/м^3 , pH водной вытяжки — 7,1, потери при прокаливании — 0,5 %. Массовая доля SiO_2 — 87,2 %;

- метакаолин месторождения «Журавлиный лог». Минералогический состав представлен полностью аморфизованным каолинитом (90–93 %), кристаллическая фаза — реликтовыми слюдой (2,5–3,0 %) и кварцем (4–5 %);

- активированный метакаолин, полученный термической обработкой исходного каолина при температуре 600°C в течение 45 мин с последующей кислотной активацией в растворе муравьиной кислоты при массовом соотношении Т:Ж = 1:1 и измельчением;

- ферросилиций. Массовая доля SiO_2 — 63,7 %;

5) пластифицирующая добавка «БЕСТ-ТВ» (ООО «Инновационные Технологии»): суперпластификатор на основе эфиров карбоновых кислот с добавлением фосфатного компонента. Жидкость темно-коричневого цвета с плотностью (при 20°C) $1,24 \text{ г/см}^3$, средняя массовая доля сухого вещества — 25 %;

6) водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732–2011.

Определение необходимого количества минеральных добавок в составе ГЦПВ осуществлялось по концентрации оксида кальция, содержащегося в специальных препаратах, представляющих собой

водные суспензии полуводного гипса, ПЦ и АМД по методике, описанной в работе [39].

Сроки схватывания ГЦПВ определяли по ГОСТ 23789–2018, среднюю плотность — по ГОСТ 12730.1–2020, подвижность смесей — по ГОСТ 5802–86. Предельное напряжение сдвига ГЦПБ устанавливалось на границе гравитационной растекаемости в соответствии с методикой [45] при помощи простейшего вискозиметра, представляющего собой полый цилиндр из полипропилена высотой 200 мм, внутренним диаметром 105 мм. Пределы прочности при изгибе и сжатии определяли на образцах-балочках размерами $40 \times 40 \times 160$ мм и половинках образцов-призм, полученных после испытания на изгиб, по ГОСТ 5802–86 с использованием испытательных машин ИП-100, ИП-1000-0, МИИ-100.

Формование образцов из ГЦП смеси методом послойной экструзии выполнялось на цеховом строительном 3D-принтере AMT S-6044 производства компании ООО «СПЕЦАВИА» (г. Ярославль), организованном по порталной системе (рис. 1), посредством ее трехмерной печати по заранее разработанной трехмерной цифровой модели G-code.

Формоустойчивость ГЦПБ определяли по суммарной высоте слоев, печатаемых на 3D-принтере без технологического перерыва. Печать слоев производилась до достижения системой критического состояния — потери устойчивости образца в целом, характеризующейся его опрокидыванием, или потери устойчивости образца на локальном участке, характеризующейся смещением напечатанных слоев. Количество образцов в серии испытаний составляло 3.

Изучение микроструктуры ГЦПК проводилось с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Merlin (Carl Zeiss), оснащенного спектрометром энергетической дисперсии AZtec X-Max (Oxford Instruments). Элементный ана-

лиз проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочем отрезке 9 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам первого этапа исследований установлены зависимости концентрации СаО в водных суспензиях полуводного гипса, ПЦ и АМД на 5-е и 7-е сутки от количества минеральной добавки (табл. 1).

Необходимое содержание АМД в составе ГЦПВ, определенное по результатам экспериментальных исследований, приведено на рис. 2.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 2, позволил установить, что наиболее эффективными АМД по критерию поглощения оксида кальция из водных ГЦП суспензий являются метакраолин, активированный метакраолин и ферросилиций, что обуславливает их наименьшее требуемое содержание в составе смеси — 20 % от массы ПЦ. На следующем этапе определено их влияние на сроки схватывания ГЦП смесей (рис. 3) и пределы прочности при изгибе и сжатии ГЦПК (рис. 4).

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить, что рассматриваемые АМД не оказывают существенного влияния на сроки схватывания и нормальную густоту смеси. При этом анализ данных, приведенных на рис. 3, свидетельствует о том, что исследуемые АМД дают возможность значительно повысить пределы прочности при изгибе и сжатии ГЦПК. Так, при использовании в качестве АМД ферросилиция пределы прочности при изгибе и сжатии увеличиваются на 15 и 9 %; метакраолина — на 48 и 49 %; активированного метакраолина — на 52 и 51 % соответственно. Кроме того, установлено, что исследуемые АМД позволяют повысить водостойкость ГЦПК, оцененную по коэффициенту размягчения, на 7–19 %. Следует отметить, что наилучшие показатели по критерию повышения пределов прочности при изгибе и сжатии получены при использовании в качестве АМД активированного метакраолина, однако затраты на его производство, связанные с активацией метакраолина в растворе органических кислот, обуславливают нецелесообразность его применения в качестве пуццоланового компонента ГЦПВ [46]. В этой связи в качестве пуццоланового компонента для ГЦП композиций в дальнейших исследованиях был принят метакраолин, а в качестве вяжущего для ГЦПБ, формируемых методом аддитивного производства, — ГЦПВ при следующем соотношении компонентов: гипс — 76 %; ПЦ — 20 %; АМД (метакраолин) — 4 %.

На следующем этапе изучены зависимости влияния модуля крупности песка на физико-технические характеристики ГЦПБ. По результатам анализа литературных данных соотношение

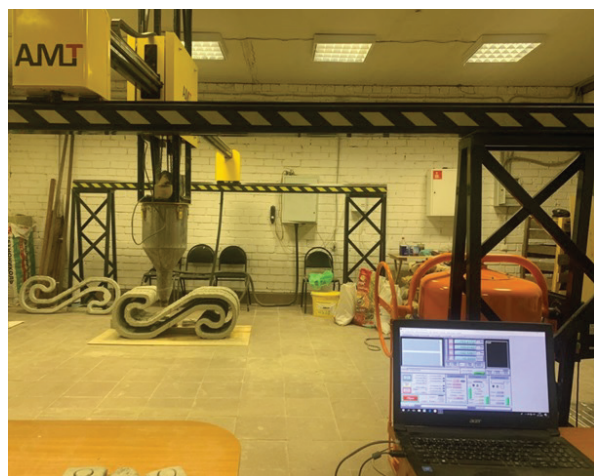


Рис. 1. Строительный 3D-принтер AMT S-6044, расположенный в лаборатории аддитивных технологий строительного производства КГАСУ

Fig. 1. Construction 3D printer AMT S-6044 in the laboratory of additive construction technologies of KSUAЕ

Табл. 1. Зависимость концентрации СаО в водных суспензиях полуводного гипса, ПЦ и минеральной добавки на 5-е и 7-е сутки от количества АД

Table 1. Dependence of the СаО concentration in aqueous suspensions of calcined gypsum, PC and mineral additives on days 5 and 7 on the amount of AMA

Вид АД Type of AMA	Количество АД, г Amount of AMA, g	Концентрация СаО в водных суспензиях СаО concentration in aqueous suspensions	
		на 5-е сутки on day 5	на 7-е сутки on day 7
Биокремнезем Silica	1,25	1,23	1,00
	2,5	1,05	0,68
	3,75	0,99	0,26
Ферросилиций Ferrosilicon	0,25	0,91	0,89
	0,75	0,72	0,68
	1,25	0,63	0,53
	2,5	0,3	0,07
	3,75	0,08	0,07
Метакаолин Metakaolin	0,25	0,87	0,80
	0,75	0,74	0,20
	1,25	0,27	0,03
	2,5	0,045	0,02
	3,75	0,028	0,02
Активированный метакаолин Activated metakaolin	0,25	0,77	0,67
	0,75	0,71	0,57
	1,25	0,64	0,40
	2,5	0,08	0,06
	3,75	0,06	0,03

ГЦПВ:заполнитель принято равным 1:2. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Установлено, что наилучшие показатели при формировании образцов методом 3D-печати по критериям

средней плотности и пределу прочности при сжатии достигаются при использовании крупного песка с модулем крупности Мк 3. Так, средняя плотность возрастает на 0,7–4,2 % по сравнению с песками

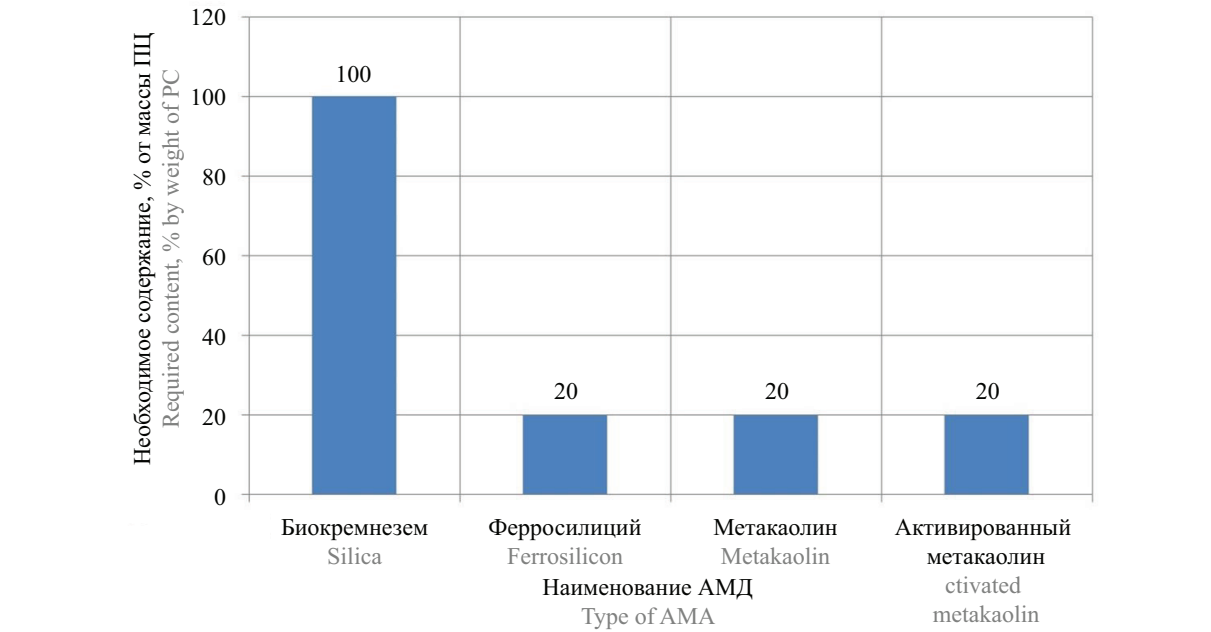


Рис. 2. Необходимое содержание исследуемых АД в составе ГЦПВ

Fig. 2. Required content of the studied AMA in GPCPC

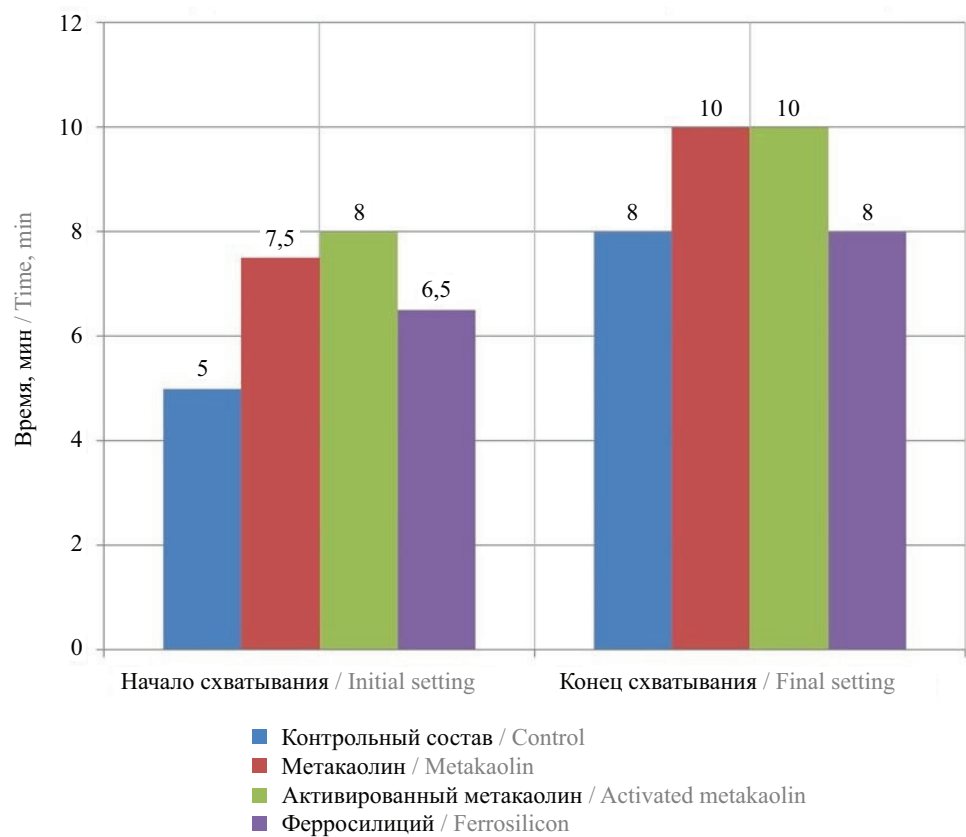


Рис. 3. Влияние исследуемых АМД на сроки схватывания ГЦПВ

Fig. 3. Influence of the studied AMA on the setting time of GCPC

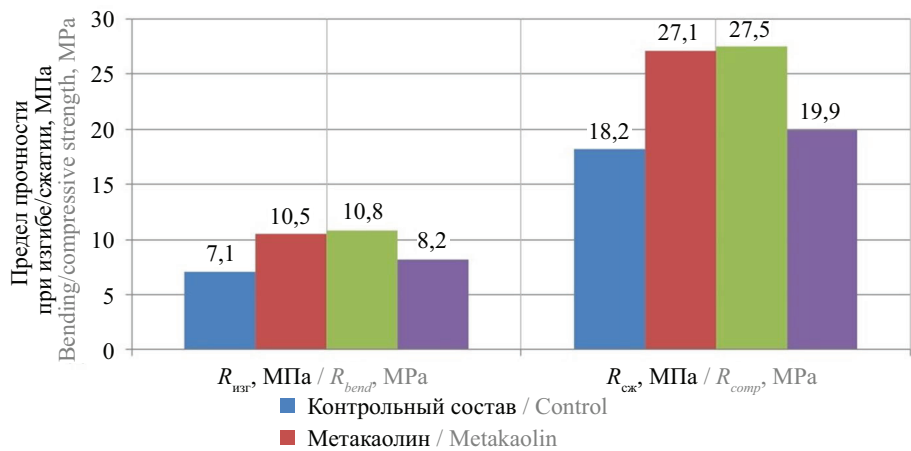


Рис. 4. Влияние исследуемых АМД на пределы прочности при изгибе и сжатии ГЦП композиций

Fig. 4. Influence of the studied AMA on the bending and compressive strengths of GCP compositions

других групп, предел прочности при сжатии — на 5,7–26,3 %. При этом модуль крупности песка в меньшей степени оказывает влияние на пределы прочности при изгибе (1,9–9,6 %). В связи с этим для проведения последующих исследований принят песок с модулем крупности Мк 3.

С целью определения влияния содержания заполнителя (песка) в составе разрабатываемого ГЦПВ на его физико-технические свойства и реотехнологические свойства смесей изготовлены 3 состава ГЦПВ (далее № 1–3), сформованные методом

3D-печати, с соотношением ГЦПВ:песок = 1:1, 1:2, 1:3 соответственно, определенным как наиболее оптимальное по данным литературного обзора. Подвижность смесей для формования методом послойной экструзии принята Пк 2 [47, 48], модуль крупности песка — Мк 3. Требуемое время жизне-способности смеси обеспечивалось путем модифицирования исследуемых составов замедляющим схватывание СП «Бест-ТБ».

Результаты экспериментальных исследований влияния содержания песка в составе ГЦПВ на рео-

Табл. 2. Влияние модуля крупности песка на физико-технические характеристики ГЦПБ
Table 2. Influence of sand fineness modulus on physical-technical characteristics of GCPC

Модуль крупности песка, Мк Sand fineness modulus, Mk	Группа песка Sand group	Средняя плотность, кг/м³ Average density, kg/m³	Предел прочности при изгибе, МПа Bending strength, MPa	Предел прочности на сжатие, МПа Compressive strength, MPa
1,2	Очень мелкий Very fine	1816	5,2	17,5
1,9	Мелкий Fine	1864	5,7	19,5
2,4	Средний Medium	1879	5,4	20,9
3	Крупный Fine gravel	1892	5,3	22,1

технологические показатели смесей (формоустойчивость, подвижность, предельное напряжение сдвига) приведены на рис. 5.

Анализ данных рис. 5 позволил установить, что наибольшее повышение реологических показателей исследуемых составов достигается при соотношении ГЦПВ:песок = 1:2 и 1:3. Так, формоустойчивость составов № 2 и 3 выше по сравнению с составом № 1 на 14 и 21 %; предельное напряжение сдвига — на 37 и 89 % соответственно, что согласуется с результатами исследования [47].

Результаты экспериментальных исследований влияния содержания песка на среднюю плотность и пределы прочности ГЦПБ приведены на рис. 6.

Анализ данных (рис. 6) дал возможность определить, что наилучшие показатели по критерию повышения прочностных показателей и средней плотности готовых изделий достигаются при соотношении ГЦПВ:песок = 1:2. Предел прочности при сжатии состава № 2 выше по сравнению с составами № 1 и 3 на 15 и 169 % соответственно; предел прочности при изгибе — на 19 и 63 % соответственно; средняя плотность — на 3 и 4 % соответственно.

По результатам выполненных исследований выявлено, что при соотношении компонентов ГЦПВ:песок = 1:2 в составе разрабатываемого ГЦПБ достигаются наилучшие физико-технические и реотехнологические свойства исследуемых композиций. При этом следует отметить, что особенности формирования внутренней структуры цементных композитов являются важнейшими факторами, определяющими их физико-технические и эксплуатационные показатели. В этой связи на следующем этапе изучены особенности структурообразования оптимального состава ГЦПБ, сформированного методом аддитивного производства (3D-печати), методом электронномикроскопического и микронзондового анализов. Результаты исследований приведены на рис. 7, 8.

Анализ микроструктуры ГЦПК (рис. 7) демонстрирует формирование сравнительно неупорядоченной структуры композита, что обусловлено применением в его составе ПЦ с высокой ранней активностью (ЦЕМ I). Для таких цементов характерны быстрые темпы образования гидросиликатных фаз, совпадающие с периодом кристаллизации гипсового вяжущего, в результате чего в структуре наблюдается «перемешивание» данных гидратных новообразований.

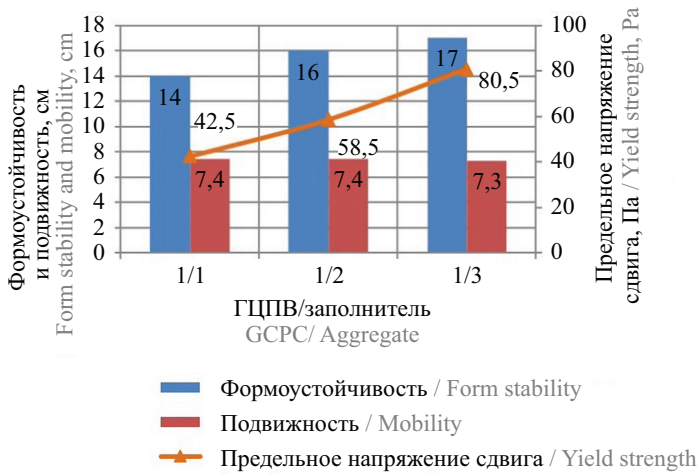


Рис. 5. Влияние содержания песка в составе ГЦПБ на реотехнологические показатели смесей
Fig. 5. Influence of sand content in composition of GCPC on the rheotechnological characteristics of mixtures

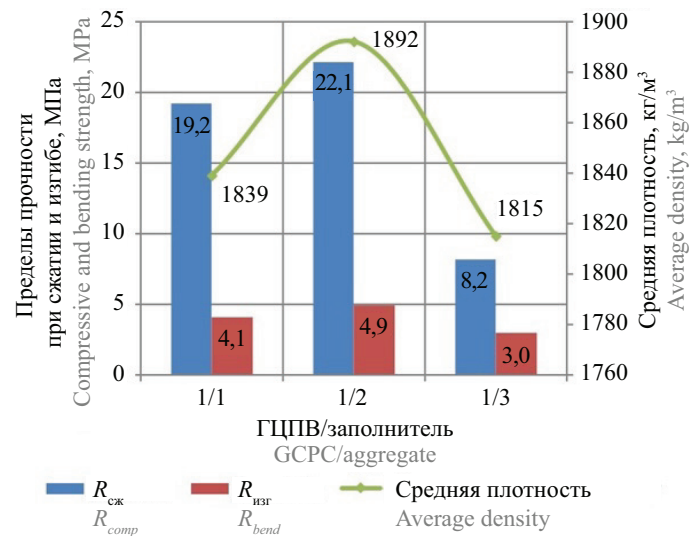


Рис. 6. Влияние содержания песка на среднюю плотность и пределы прочности ГЦПВ
Fig. 6. Influence of sand content on the average density and strength of GPCP

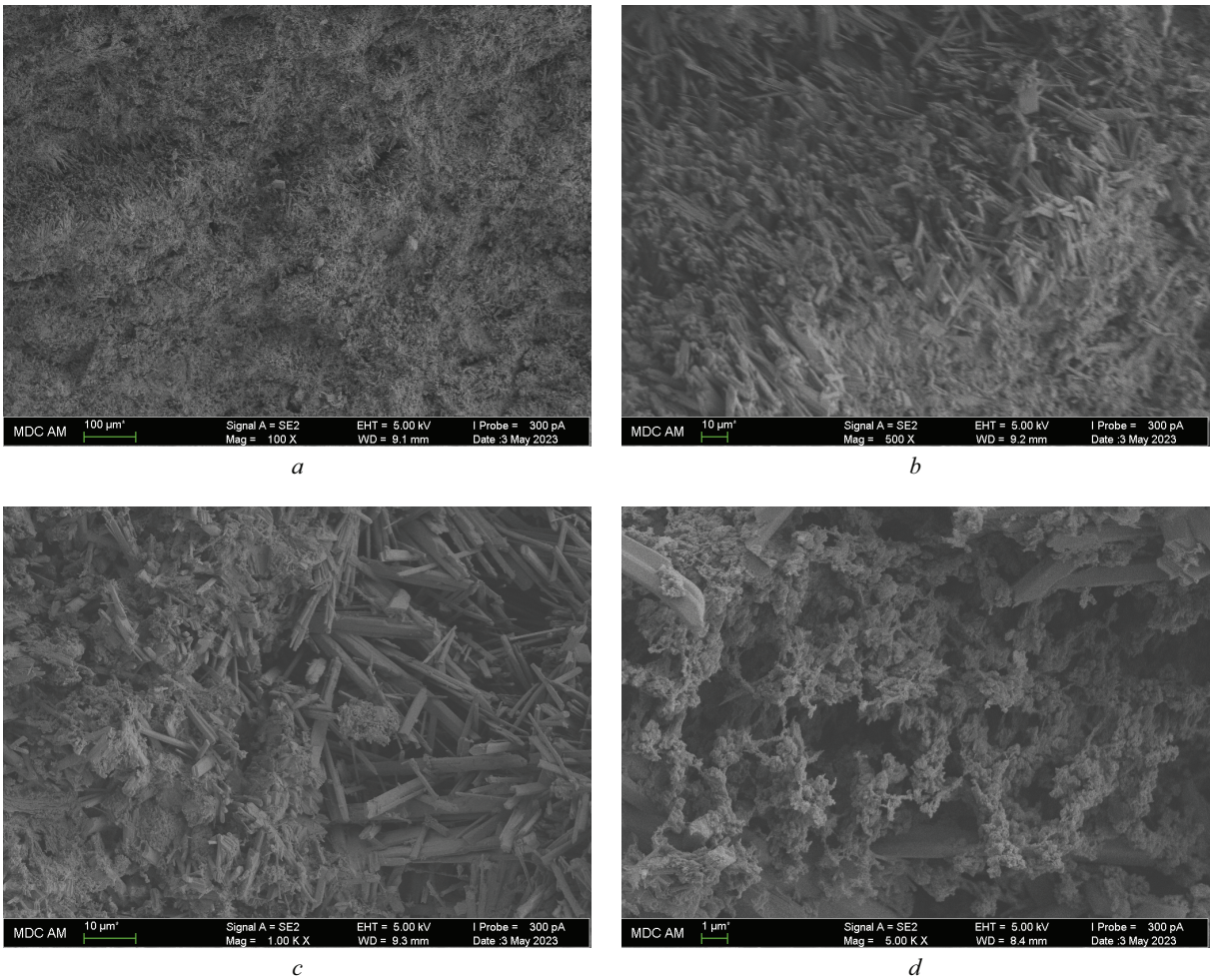


Рис. 7. Электронно-микроскопические снимки исследуемого состава ГЦПК при различных увеличениях: а — увеличение ×100; б — увеличение ×500; в — увеличение ×1000; д — увеличение ×5000
Fig. 7. SEM images of the studied composition of GPCP at various magnifications: а — magnification ×100; б — magnification ×500; в — magnification ×1,000; д — magnification ×5,000

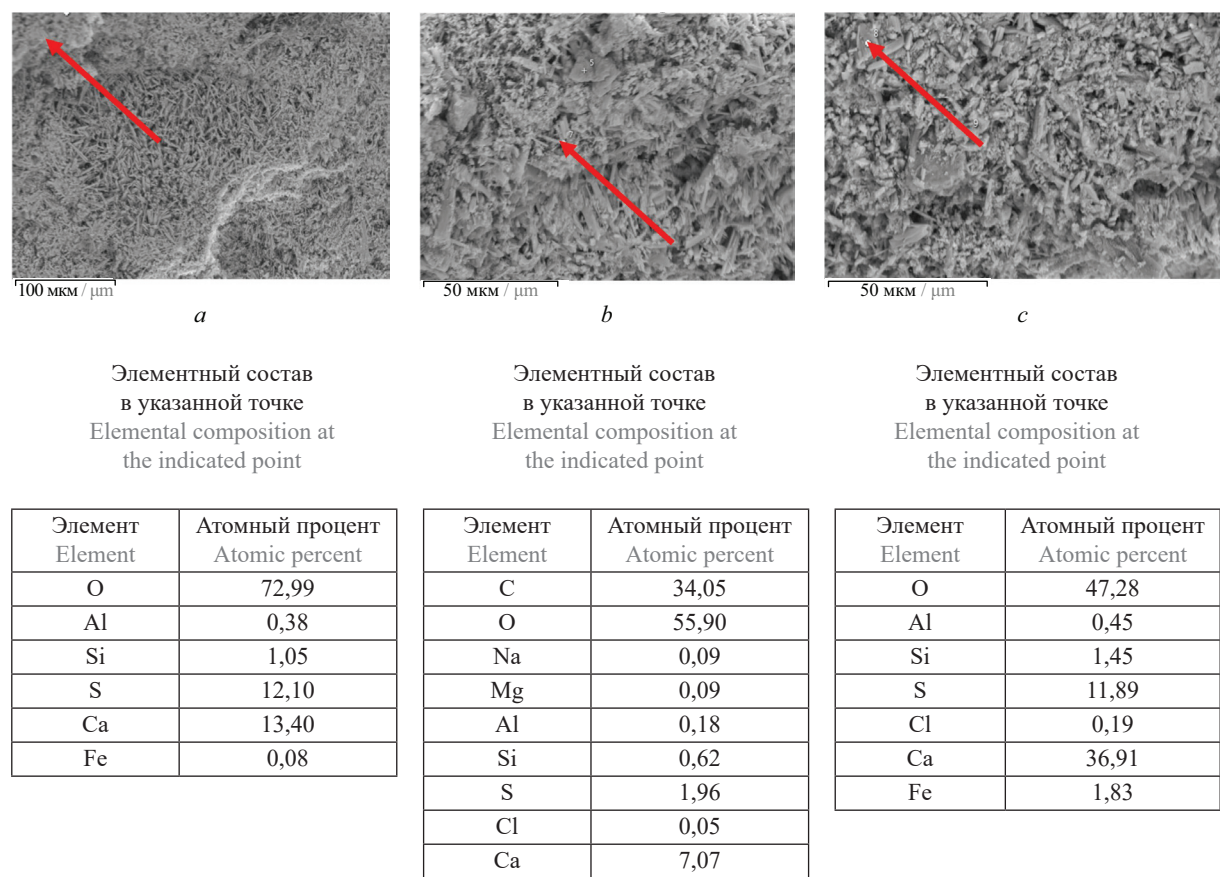


Рис. 8. Элементный состав продуктов гидратации состава № 1 в указанных точках: *a* — увеличение ×250; *b* — увеличение ×750; *c* — увеличение ×830

Fig. 8. Elemental composition of hydration products of composition No. 1 at the indicated points: *a* — magnification ×250; *b* — magnification ×750; *c* — magnification ×830

Изучение элементного состава образца в указанной на рис. 8, *b* точке свидетельствует о незначительном количестве игольчатых включений высокоосновной формы гидросульфалюмината кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Вышеуказанные явления подтверждают потенциал дальнейшего совершенствования составов ГЦПБ, формуемых методом аддитивного строительного производства, для повышения физико-технических свойств и долговечности готовых изделий. В этой связи особую актуальность при проведении дальнейших исследований представляет оптимизация состава ГЦПБ для 3D-печати, разработка полифункциональных комплексных добавок и изучение их влияния на свойства модифицированных бетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теоретически обосновано и экспериментально определено соотношение компонентов в составе ГЦПВ для МЗБ в технологии аддитивного производства, обеспечивающее формирование композитов с устойчивыми и стабильными структурой и физико-техническими характеристиками: гипс — 76 %; ПЦ — 20 %; АМД (метакаолин) — 4 %.

На основе анализа имеющихся теоретических представлений о роли заполнителя в формировании реотехнологических и физико-механических характеристик МЗБ и экспериментальных исследований обоснована рациональность применения в технологии аддитивного производства бетонов с соотношением ГЦПВ:заполнитель = 1:2 при модуле крупности песка Мк 3, обеспечивающим следующие характеристики контрольного состава бетона: $R_{\text{сж}} = 22,1$ МПа, $R_{\text{изг}} = 4,9$ МПа, $r_{\text{ср}} = 1892$ кг/м³, формоустойчивость — 16 см, $t_0 = 58,5$ Па.

Изучение особенностей структурообразования ГЦПБ оптимального состава, сформованного методом аддитивного производства, с применением электронно-микроскопического и микрозондового анализов позволило установить формирование сравнительно неупорядоченной структуры композита вследствие применения ПЦ с высокой ранней активностью, характеризующегося быстрыми темпами образования гидросиликатных фаз, совпадающих с периодом кристаллизации ГВ. Выявлено формирование в структуре композита игольчатых включений этtringита, что, по мнению авторов, может

приводить к снижению физико-технических свойств и долговечности готовых изделий и свидетельствует о потенциале дальнейшего совершенствования составов ГЦПБ в технологии аддитивного строительного производства.

Особую актуальность при проведении дальнейших исследований представляет разработка полифункциональных комплексных добавок и изучение их влияния на свойства модифицированных ГЦПБ, формируемых методом 3D-печати.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. История науки и техники : учебное пособие. СПб. : Лань, 2022. 528 с.
2. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. История композиционных минеральных вяжущих веществ : учебное пособие. СПб. : Лань, 2023. 268 с.
3. Хакимов Ф.М. Бетон на гипсоангидридовом цементе // Труды Казанского института коммунального строительства. 1936.
4. Рахимов Р.З., Халиуллин М.И. Состояние и тенденции развития промышленности гипсовых строительных материалов // Строительные материалы. 2010. № 12. С. 44–46. EDN NQTZQF.
5. Алтыкис М.Г., Рахимов Р.З. Гипс. Строительные материалы и изделия : учебное пособие. Казань : КИСИ, 1994. 107 с.
6. Khaliullin M., Rakhimov R., Faizrakhmanov I. The influence of thermally activated clay additives on the properties of composite gypsum binder // ZKG International. 2017. Vol. 70. Issue 5. Pp. 58–63. EDN XNKKCU.
7. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Çopuroğlu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 132. P. 106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040
8. Muthukrishnan S., Ramakrishnan S., Sanjay-an J. Effect of microwave heating on interlayer bonding and buildability of geopolymer 3D concrete printing // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 265. P. 120786. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120786
9. Chen Y., Jansen K., Zhang H., Rodriguez C.R., Gan Y., Çopuroğlu O. et al. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 262. P. 120094. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094
10. Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 244. P. 118305. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118305
11. Liu J., Li S., Gunasekara C., Fox K., Tran P. 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 314. P. 125561. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125561
12. Van den Heever M., Bester F., Kruger J., van Zijl G. Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 50. P. 102569. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102569
13. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 143. P. 106386. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106386
14. Baduge S.K., Navaratnam S., Abu-Zidan Y., McCormack T., Nguyen K., Mendis P. et al. Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods // Structures. 2021. Vol. 29. Pp. 1597–1609. DOI: 10.1016/j.jstruc.2020.12.061
15. Lu B., Li M., Wong T.N., Qian S. Effect of printing parameters on material distribution in spray-based 3D concrete printing (S-3DCP) // Automation in Construction. 2021. Vol. 124. P. 103570. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103570
16. Salman N.M., Ma G., Ijaz N., Wang L. Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3D concrete printing (3DCP): Prospects and challenges // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 291. P. 123281. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123281
17. Shakor P., Nejadi S., Paul G., Sanjayan J. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and porosity in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials // Automation in Construction. 2020. Vol. 110. P. 102964. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102964
18. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
19. Ma X., Tan L., Lu Y., Yao W., Wei Y. Upcycling of waste plasterboard for the synthesis of high-quality gypsum-based 3D printing powder // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 373. P. 130846. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130846
20. Ma B., Jiang Q., Huang J., Wang X., Leng J. Effect of different silica particles on flowability of

gypsum powder for 3D powder printing // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 217. Pp. 394–402. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.097

21. Dantas A.C.S., Scalabrin D.H., De Farias R., Barbosa A.A., Ferraz A.V., Wirth C. Design of highly porous hydroxyapatite scaffolds by conversion of 3d printed gypsum structures – a comparison study // Procedia CIRP. 2016. Vol. 49. Pp. 55–60. DOI: 10.1016/j.procir.2015.07.030

22. Chernyisheva N.V., Shatalova S.V., Drebezgova M.Yu., Lesnichenko E.N. Thermal insulating and constructive foamed concrete on a composite gypsum binder // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 125–130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.125

23. Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Елистраткин М.Ю., Дребезгова М.Ю., Масалитина С.В. Реологические свойства гипсоцементных вяжущих и формовочных смесей на их основе для 3D-аддитивных технологий строительства // Строительные материалы. 2022. № 8. С. 23–30. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-805-8-23-30. EDN WSXKNG.

24. Чернышева Н.В., Шаталова С.В., Масалитина С.В. Композиционные гипсовые вяжущие для поризованных композитов в технологии строительной печати // Университетская наука. 2021. № 1 (11). С. 91–94. EDN ZSAQTD.

25. Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Шерemet А.А. Разработка комплексного решения для 3D-печати стеновых конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19. EDN NMUSWL.

26. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. М. ; Л. : Гос. изд-во строит. лит., 1943. 372 с.

27. Юнг В.Н., Бутт Ю.М., Журавлев В.Ф., Око-роков С.Д. Технология вяжущих веществ : учебник. М. : Гос. изд-во лит. по строит. материалам, 1952. 600 с.

28. Ребиндер П.А. Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел // Сборник АН СССР. 1947. Т. 1. С. 84–88.

29. Волженский А.В., Иванникова Р.В. Гипсоцементные и гипсошлаковые вяжущие вещества // Строительные материалы, изделия и конструкции. 1955. № 4. С. 13–16.

30. Волженский А.В., Стамбулко В.И., Ферронская А.В. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. М. : Стройиздат, 1971. 318 с.

31. Волженский А.В., Коган Г.С., Краснослободская З.С. Влияние активного кремнезема на процессы взаимодействия алюминатных составляющих портландцементного клинкера с гипсом // Строительные материалы. 1963. № 1. С. 31–34.

32. Волженский А.В., Коган Г.С., Арбузов Н.Т. Гипсобетонные панели для перегородок и внутренней облицовки наружных стен. М. : Промстройиздат, 1955. 186 с.

33. Ферронская А.В. Долговечность гипсовых материалов, изделий и конструкций. М. : Стройиздат, 1984. 253 с.

34. Сегодник Д.Н., Потапова Е.Н. Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее с активной минеральной добавкой метаксаолин // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. № 8 (157). С. 77–79. EDN STFXJF.

35. Волженский А.В., Роговой М.И., Стамбулко В.И. Гипсоцементные и гипсошлаковые вяжущие изделия. М. : Госстройиздат, 1960. 168 с.

36. Булычев Г.Г. Смешанные гипсы: производство и применение в строительстве. М. : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. 135 с.

37. Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Власов В.В. Высокопрочное гипсоцементно-цеолитовое вяжущее // Строительные материалы. 2010. № 2. С. 53–55. EDN MBCHZR.

38. Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Ильичева О.М. Деформации высокопрочного композиционного гипсового вяжущего при твердении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2010. № 15 (191). С. 51–53. EDN MNJOMJ.

39. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) : справочник. М. : Изд-во АСВ, 2004. 485 с.

40. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 6–14. DOI: 10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178. EDN ZOWEOF.

41. Шорстова Е.С., Ключев А.В., Ключев С.В., Гарькина И.А. Тонкомолотый отсев дробления кварцито-песчаника в фибробетонной смеси для 3D-печати // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 3 (56). С. 69–76. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_69. EDN MBGPIR.

42. Славчева Г.С., Ибряева А.И. Влияние концентрации и гранулометрии наполнителей на реологические свойства цементных систем // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2 (2). С. 29–36. EDN SHMTRK.

43. Торишин А.О., Боровикова С.О., Корчунов И.В., Потапова Е.Н. Разработка строительной смеси для 3D-печати // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 2 (198). С. 164–166. EDN VMNBEG.

44. Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B. Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1037. Pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26

45. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Из-во АСВ, 2006. 368 с. EDN QNMNZZ.

46. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Механоактивированное гипсоцементно-песчано-вяжущее на основе модифицированного низкомарочного сырья // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 187–195. EDN XNGJFB.

47. Мухаметрахимов Р.Х., Лукманова Л.В. Влияние портландцементов с различным минералогическим составом на основные свойства композитов, сформованных методом послойного экструдирования (3D-печати) // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 2 (56). С. 37–49. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_37. EDN DXDYSR.

48. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Influence of cement-sand mortar mobility on the quality of 3D printed hardened composite // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. Vol. 94. P. 9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4

Поступила в редакцию 16 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 2 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Равиль Зуфарович Рахимов** — доктор технических наук, профессор, советник ректората, член-корреспондент РААСН; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 612876, Scopus: 7005848197, ResearcherID: AAG-2224-2019, ORCID: 0000-0002-4251-1605; rahimov11@bk.ru;

Руستم Ханифович Мухаметрахимов — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, Республика Татарстан; РИНЦ ID: 616214, Scopus: 57194452261, ResearcherID: N-9429-2016, ORCID: 0000-0003-2062-5289; muhametrakhimov@mail.ru;

Альберт Радикович Галаутдинов — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, Республика Татарстан; РИНЦ ID: 836160, Scopus: 57194458273, ResearcherID: G-6938-2018, ORCID: 0000-0001-9999-6925; galautdinov89@mail.ru;

Лилия Валиевна Зиганшина — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры технологий строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, Республика Татарстан; SPIN-код: 6496-7055, Scopus: 57194444416, ResearcherID: AAG-9477-2020, ORCID: 0000-0003-0090-2410; lilya0503199@gmail.com.

Вклад авторов:

Рахимов Р.З. — научное консультирование, концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Мухаметрахимов Р.Х. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, проведение лабораторных испытаний, обработка результатов испытаний, написание исходного текста, итоговые выводы.

Галаутдинов А.Р. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов испытаний, доработка текста, итоговые выводы.

Зиганшина Л.В. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов испытаний, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. *History of science and technology : textbook*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022; 528. (rus.).

2. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. *History of composite mineral binders : textbook*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2023; 268. (rus.).

3. Khakimov F.M. Concrete on gypsum anhydride cement. *Proceedings of the Kazan Institute of Communal Construction*. 1936. (rus.).

4. Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I. State and trends in the development of the gypsum construction materials industry. *Construction Materials*. 2010; 12:44-46. EDN NQTZQF. (rus.).

5. Altykis M.G., Rakhimov R.Z. *Gips. Construction materials and products : textbook*. Kazan, KISI, 1994; 107. (rus.).

6. Khaliullin M., Rakhimov R., Faizrakhmanov I. The influence of thermally activated clay additives

on the properties of composite gypsum binder. *ZKG International*. 2017; 70(5):58–63. EDN XNKKCU.

7. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Çopuroğlu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040

8. Muthukrishnan S., Ramakrishnan S., Sanjayan J. Effect of microwave heating on interlayer bonding and buildability of geopolymers 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*. 2020; 265:120786. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120786

9. Chen Y., Jansen K., Zhang H., Rodriguez C.R., Gan Y., Çopuroğlu O. et al. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*. 2020; 262:120094. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094

10. Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2020; 244:118305. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118305

11. Liu J., Li S., Gunasekara C., Fox K., Tran P. 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure. *Construction and Building Materials*. 2022; 314:125561. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125561

12. Van den Heever M., Bester F., Kruger J., van Zijl G. Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements. *Additive Manufacturing*. 2022; 50:102569. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102569

13. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process. *Cement and Concrete Research*. 2021; 143:106386. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106386

14. Baduge S.K., Navaratnam S., Abu-Zidan Y., McCormack T., Nguyen K., Mendis P. et al. Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. *Structures*. 2021; 29:1597–1609. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.061

15. Lu B., Li M., Wong T.N., Qian S. Effect of printing parameters on material distribution in spray-based 3D concrete printing (S-3DCP). *Automation in Construction*. 2021; 124:103570. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103570

16. Salman N.M., Ma G., Ijaz N., Wang L. Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3D concrete printing (3DCP): Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*. 2021; 291:123281. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123281

17. Shakor P., Nejadi S., Paul G., Sanjayan J. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and porosity

in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials. *Automation in Construction*. 2020; 110:102964. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102964

18. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 143:172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

19. Ma X., Tan L., Lu Y., Yao W., Wei Y. Upcycling of waste plasterboard for the synthesis of high-quality gypsum-based 3D printing powder. *Construction and Building Materials*. 2023; 373:130846. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130846

20. Ma B., Jiang Q., Huang J., Wang X., Leng J. Effect of different silica particles on flowability of gypsum powder for 3D powder printing. *Construction and Building Materials*. 2019; 217:394–402. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.097

21. Dantas A.C.S., Scalabrin D.H., De Farias R., Barbosa A.A., Ferraz A.V., Wirth C. Design of Highly Porous Hydroxyapatite Scaffolds by Conversion of 3D Printed Gypsum Structures – A Comparison Study. *Procedia CIRP*. 2016; 49:55–60. DOI: 10.1016/j.procir.2015.07.030

22. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Drebezgoва M.Yu., Lesnichenko E.N. Thermal Insulating and Constructive Foamed Concrete on a Composite Gypsum Binder. *Materials Science Forum*. 2019; 974:125–130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.125

23. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Elistratkin M.Yu., Drebezgoва M.Yu., Masalitina S.V. Rheological properties of gypsum cement binders and molding mixtures based on them for 3D additive construction technologies. *Construction Materials*. 2022; 8:23–30. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-805-8-23-30. EDN WSXKNG. (rus.).

24. Chernysheva N.V., Shatalova S.V., Masalitina S.V. Composite gypsum binders for porous composites in construction printing technology. *University Science*. 2021; 1(11):91–94. EDN ZSAQTD. (rus.).

25. Shatalova S., Chernysheva N., Lesovik V., Elistratkin M., Sheremet A. Development of a comprehensive solution for 3D printing of wall structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 10:8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-19. EDN NMUSWL. (rus.).

26. Budnikov P.P. *Gypsum, its research and application*. Moscow; Leningrad, State Publishing House of Construction Literature, 1943; 368. (rus.).

27. Yung V.N., Butt Yu.M., Zhuravlev V.F., Okorokov S.D. *Technology of binders*. Moscow, State publishing house of literature on building materials, 1952; 600. (rus.).

28. Rebinder P.A. Physico-chemical studies of the deformation processes of solids. *Collection of the USSR Academy of Sciences*. 1947; 1:84–88. (rus.).

29. Volzhenskiy A.V., Ivannikova R.V. Gypsum cement and gypsum slag binders. *Building Materials, Products and Structures*. 1955; 4:13-16. (rus.).
30. Volzhenskiy A.V., Stambulko V.I., Ferronskaya A.V. *Gypsum-cement-pozzolan binders, concretes and products*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971; 318. (rus.).
31. Volzhenskiy A.V., Kogan G.S., Krasnoslobodskaya Z.S. The effect of active silica on the processes of interaction of aluminate components of Portland cement clinker with gypsum. *Construction Materials*. 1963; 1:31-34. (rus.).
32. Volzhenskiy A.V., Kogan G.S., Arbuzov N.T. *Gypsum concrete panels for partitions and interior cladding of exterior walls*. Moscow, Promstroyizdat, 1955; 186. (rus.).
33. Ferronskaya A.V. *Durability of gypsum materials, products and structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984; 253. (rus.).
34. Segodnik D.N., Potapova E.N. Gypsum cement — pozzolanic binder with active mineral additives metakaolin. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2014; 28(8):(157):77-79. EDN STFXJF. (rus.).
35. Volzhenskiy A.V., Rogovoy M.I., Stambulko V.I. *Gypsum cement and gypsum slag products*. Moscow, Gosstroyizdat, 1960; 168. (rus.).
36. Bulychev G.G. *Mixed gypsum: production and application in construction*. Moscow, State Publishing House of Literature on Construction and Architecture, 1952; 135. (rus.).
37. Sagdatullin D.G., Morozova N.N., Khozin V.G., Vlasov V.V. High-strength gypsum cement-ceolite binder. *Construction Materials*. 2010; 2:53-55. EDN MBCHZR. (rus.).
38. Sagdatullin D.G., Morozova N.N., Khozin V.G., Ilichyova O.M. Deformations of high-strength composition of gypseous binding during maturing. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2010; 15(191):51-53. EDN MNJOMJ. (rus.).
39. Ferronskaya A.V. *Gypsum materials and products (production and application) : guide*. Moscow, ASV, 2004; 485. (rus.).
40. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Glagolev E.S., Shatalova S.V., Starikov M.S. Formation of properties of compositions for construction printing. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017; 10:6-14. DOI: 10.12737/article_59cd0c57ede8c1.83340178. EDN ZOWEOF. (rus.).
41. Shorstova E.S., Klyuev A.V., Klyuev S.V., Garkina I.A. Thin-grounded quartzite sandstone crushing screening in fiber concrete mixture for 3D-printing. *Regional Architecture and Engineering*. 2023; 3(56):69-76. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_69. EDN MBGPIP. (rus.).
42. Slavcheva G.S., Ibryaeva A.I. Effect of concentration and filler's granulometry for rheological properties cement paste. Bulletin of the Tver State Technical University. Construction series. *Electrical engineering and chemical technologies*. 2019; 2(2):29-36. EDN SHMTRK. (rus.).
43. Torshin A.O., Borovikova S.O., Korchunov I.V., Potapova E.N. Development of construction mixture for 3D-printing. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2018; 32(2):(198):164-166. EDN VMNBEG. (rus.).
44. Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B. Mortar for 3D printing based on gypsum binders. *Materials Science Forum*. 2021; 1037:26-31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26
45. Bazhenov Yu.M. *Modified high-quality concrete*. Moscow, ASV Publ., 2006; 368. EDN QNMNZZ. (rus.).
46. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R. Mechanically activated gypsum-cement-pozzolan binder based on modified low-grade raw materials. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 1(43):187-195. EDN XNGJFB. (rus.).
47. Mukhametrakhimov R.Kh., Lukmanova L.V. Influence of Portland cements with different mineralogical composition on basic properties of 3d-printed composites. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021; 2(56):37-49. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_37. EDN DXDYSR. (rus.).
48. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Influence Of Cement-Sand Mortar Mobility On The Quality Of 3D Printed Hardened Composite. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021; 94:9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4

Received November 16, 2023.

Adopted in revised form on November 27, 2023.

Approved for publication on February 2, 2024.

B I O N O T E S : **Ravil Z. Rakhimov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to the Rector's Office, Corresponding Member of the RAASN; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 612876, Scopus: 7005848197, ResearcherID: AAG-2224-2019, ORCID: 0000-0002-4251-1605rahimov11@bk.ru;

Rustem Kh. Mukhametrakhimov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production Technologies; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 616214, Scopus: 57194452261, ResearcherID: N-9429-2016, ORCID: 0000-0003-2062-5289; muhametrahimov@mail.ru;

Albert R. Galautdinov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production Technologies; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 836160, Scopus: 57194458273, ResearcherID: G-6938-2018, ORCID: 0000-0001-9999-6925; galautdinov89@mail.ru;

Liliya V. Ziganshina — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Department of Construction Production Technologies; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; Scopus: 57194444416, ResearcherID: AAG-9477-2020, ORCID: 0000-0003-0090-2410; lilya0503199@gmail.com.

Contribution of the authors:

Ravil Z. Rakhimov — scientific consulting, research concept, development of methodology, revision of the text, final conclusions.

Rustem Kh. Mukhametrakhimov — scientific leadership, research concept, development of methodology, carrying out laboratory tests, processing of test results, writing the source text, final conclusions.

Albert R. Galautdinov — carrying out laboratory tests, processing of test results, revision of the text, final conclusions.

Liliya V. Ziganshina — carrying out laboratory tests, processing of test results, revision of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Моделирование влияния параметров массопереноса на кинетику коррозионного взаимодействия бетона с биологическими средами

Сергей Викторович Федосов, Борис Евгеньевич Нармания

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Воздействие микроорганизмов на цементный камень (ЦК) бетона ускоряет вывод «свободного гидроксида кальция» из поровой структуры и способствует разложению кальцийсодержащих фаз, в результате чего происходит снижение прочностных характеристик бетона и дальнейшее разрушение. Биоповреждение необходимо учитывать при определении долговечности бетона. Математическое моделирование позволяет на любом этапе жизненного цикла бетонного изделия спрогнозировать его состояние и установить остаточный срок службы.

Материалы и методы. Влияние параметров массопереноса на изменение концентраций гидроксида кальция в бетоне и на интенсивность его вымывания в жидкую среду показано графически по результатам численного моделирования. Разработана математическая модель для описания процессов массопереноса при биологической коррозии бетона, в которой влияние микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности объясняется внутренним источником поглощения или высвобождения массы, в частности «свободного гидроксида кальция», в бетонном ЦК. Условия достижения значений концентраций гидроксида кальция в ЦК, соответствующих началу разложения высокоосновных составляющих, описываются с помощью решения задачи массообмена.

Результаты. На основе математической модели, описывающей кинетику массопереноса, разработан математический аппарат для прогнозирования степени биодеградации цементных бетонов. Представлены графические зависимости, которые являются результатом имитационного численного эксперимента. Они описывают для широкого диапазона параметров системы влияние критериев подобия (Фурье, Био) и коэффициента, учитывающего фазовые характеристики, на динамику и кинетику процесса массопереноса при биокоррозии бетона. Наиболее интенсивное изменение кинетики и динамики массообмена наблюдается на начальных стадиях воздействия продуктов жизнедеятельности микроорганизмов при жидкостной коррозии бетона.

Выводы. Полученные графические зависимости дают понимание об условиях замедления и интенсификации процессов массопереноса в системе «бетон – биопленка – жидкая среда». Инженерная методика расчета параметров массообмена и срока службы бетона применима на любом этапе эксплуатации железобетонных изделий и конструкций и дает возможность экономически обоснованно назначать средства защиты и устанавливать сроки их использования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биокоррозия бетона, долговечность бетона, процессы массопереноса, кинетика массопереноса, прогнозирование долговечности, уравнения массопроводности, математическое моделирование, графическое моделирование, параметры массопереноса, выщелачивание бетона

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федосов С.В., Нармания Б.Е. Моделирование влияния параметров массопереноса на кинетику коррозионного взаимодействия бетона с биологическими средами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 596–605. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.596-605

Автор, ответственный за переписку: Борис Евгеньевич Нармания, borisfablee@gmail.com.

Modelling the influence of mass transfer parameters on the kinetics of corrosion interaction of concrete and biological media

Sergey V. Fedosov, Boris E. Narmaniya

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The impact of microorganisms on the cement stone of concrete accelerates the removal of “free calcium hydroxide” from the pore structure and promotes the decomposition of calcium-containing phases, resulting in a decrease in the strength characteristics of concrete and further destruction. Biodegradation must be taken into account when determining the durability of concrete. Mathematical modelling makes it possible to predict its condition at any stage of the life cycle

of a concrete product and to establish its remaining service life.

Materials and methods. The effect of mass transfer parameters on changes in calcium hydroxide concentrations in concrete and on the intensity of its leaching into a liquid medium is shown graphically by the results of numerical modelling. The description of mass transfer processes in concrete biocorrosion was carried out using a developed mathematical model, which takes into account the influence of microorganisms and their waste products as an internal source of absorption or release of mass of “free calcium hydroxide” in concrete cement stone. The conditions for reaching the values of calcium hydroxide concentrations in cement stone corresponding to the beginning of decomposition of highly basic components are described by solving the mass transfer problem.

Results. Based on the mathematical model describing the kinetics of mass transfer, a mathematical apparatus for predicting the degree of biodegradation of cement concrete was developed. Graphical dependences are presented, which are the result of a simulated numerical experiment, describing the effect of similarity criteria (Fourier, Bio) and a coefficient taking into account phase characteristics on the dynamics and kinetics of the mass transfer process during concrete biodegradation in a wide range of system parameters. The most intense change in the kinetics and dynamics of mass transfer occurs at the initial stages of exposure to the products of microorganisms during liquid corrosion of concrete.

Conclusions. The obtained graphical dependences provide an understanding of the conditions for slowing down and intensifying mass transfer processes in the concrete – biofilm – liquid medium system. The engineering methodology of calculation of mass transfer parameters and service life of concrete is applicable at any stage of operation of reinforced concrete products and structures and makes it economically feasible to assign protective equipment and set the terms of their use.

KEYWORDS: concrete biocorrosion, concrete durability, mass transfer processes, mass transfer kinetics, durability prediction, mass transfer equations, mathematical modelling, graphical modelling, mass transfer parameters, concrete leaching

FOR CITATION: Fedosov S.V., Narmaniya B.E. Modelling the influence of mass transfer parameters on the kinetics of corrosion interaction of concrete and biological media. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):596-605. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.596-605 (rus.).

Corresponding author: Boris E. Narmaniya, borisfablee@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование повреждений бетона, вызванных коррозией, — сложная задача. Это требует не только реалистичного подхода к моделированию протекающих химических реакций и скорости образования продуктов коррозии, но и надлежащей оценки механических и диффузионных свойств продуктов коррозии. Кроме того, немеханические процессы должны быть связаны с механическим поведением бетона, чтобы правильно оценить влияние повреждения на кинетику реакций.

При исследовании биоповреждений возникают некоторые осложнения: затрудненность диагностики биодеструкции и идентификации микроорганизмов на ранних стадиях развития, что требует участия специалистов для распознавания; микроорганизмы в биоценозах оказывают взаимное влияние друг на друга, синергетически действуют на материалы, умеют адаптироваться к окружающей среде и различным субстратам, которые они колонизируют, что затрудняет моделирование и прогнозирование развития биоповреждений; сложность выделения степени повреждения материала в реальных условиях эксплуатации именно микроорганизмами, поскольку происходит усиление других видов коррозионных процессов в композитах и покрытиях и синергетическое действие с окружающей средой.

Вследствие широкого внедрения информационных технологий в науку и технику при разработке и изучении сложных систем обязательным этапом стало моделирование процессов, происходящих при их эксплуатации, для прогнозирования поведения материалов и компонентов системы при различных условиях, статистическая оценка параметров системы для управления ее свойствами и характери-

стиками. Многообразие методологий и подходов позволяет разрабатывать модели деструкции различных строительных материалов в разных условиях эксплуатации [1–6]. При внедрении новых материалов и технологических процессов в производство строительных изделий и конструкций неотъемлемым элементом стало прогнозирование характеристик и срока их службы с помощью моделей [7–11].

Математические модели для описания коррозии материалов должны учитывать специфические ситуации и основные особенности протекающих процессов. Эти модели наиболее естественно выражаются в форме дифференциальных уравнений [12–17].

Степень повреждения бетона и железобетона жидкими агрессивными средами обусловлена их физико-химическими свойствами и механизмом взаимодействия агрессивных компонентов с композиционным материалом. При постоянном контакте с агрессивной жидкостью активно протекают процессы ионного обмена с внешней средой. Накопление агрессивного агента в поровом пространстве бетона также может происходить в условиях капиллярного всасывания, когда бетонное или железобетонное изделие или конструкция частично погружены в агрессивный раствор.

Для описания скорости поступления агрессивных веществ (хлорид-ионы, углекислый газ) в поровую структуру бетона обычно используется первый закон Фика (1). Однако, поскольку при воздействии на бетон агрессивных компонентов среды происходит изменение его структуры, состава, пористости, реакционной способности и других параметров [18–21], выражение (1) является приблизительным. Изменение состава компонентов бетона и уровня относительной влажности в его глубине будет от-

клоняться от значений диффузии, определяемых законом Фика [22, 23]:

$$J = -D(\partial C)/\partial x, \quad (1)$$

где J — плотность диффузионного потока массы вещества, кг/(м²·с); D — коэффициент диффузии, м²/с; $\partial C/\partial x$ — градиент концентрации, кг/(м³·м).

Нестационарность диффузионных процессов в бетоне учитывается вторым законом Фика, в котором поток переносимого компонента зависит от времени [24, 25]:

$$\partial C/\partial t = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (2)$$

При интегрировании выражения (2) принимается постоянство во времени концентрации переносимого компонента на поверхности бетона, обозначаемой C_s ($C = C_s$ при $x = 0$ и для любых значений t), и коэффициента диффузии D , а также однородность бетона и отсутствие в нем агрессивных веществ до начала эксплуатации ($C = 0$ при $x > 0$ и $t = 0$) и, как следствие, неизменность коэффициента диффузии по толщине бетона.

Основным преимуществом наличия реалистичной модели для моделирования коррозии, вызванной действием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, является не только ее способность исследовать возможное возникновение и прогрессирование повреждений в старых железобетонных конструкциях с недостаточной толщиной бетонного покрытия, но и ее использование в качестве инженерного инструмента в процессе проектирования конструкций.

Моделирование процесса коррозии бетона способствует глубокому изучению закономерностей этого явления, на основе чего становится более точным прогнозирование ожидаемых повреждений и определение долговечности бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Цель исследования — численное моделирование влияния параметров массопереноса (критериев подобия Фурье и Био, коэффициента, учитывающего фазовые характеристики) на интенсивность процесса коррозионного взаимодействия цементного бетона с микробиологической средой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования основана на графическом отображении результатов численного моделирования влияния параметров массопереноса на изменение содержания в бетоне «свободного гидроксида кальция», под которым понимается растворенный в поровой жидкости $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующийся при твердении бетона в результате гидратации цементных составляющих. При воздействии жидких сред этот компонент вступает в реакцию с агрессивными веществами и выводится из поровой жидкости. Графические зависимости позволяют

наглядно оценить закономерности механизма протекания массообменных процессов.

Диффузионный критерий Фурье Fo_m характеризует изменение скорости переноса вещества в твердом теле с течением времени. Критерий Био Bi_m отображает соотношение скорости переноса вещества от поверхности раздела фаз в агрессивную среду и скорости массопроводности.

Для прогнозирования влияния биологических сред на срок службы железобетонных изделий и конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах, разработана математическая модель, описывающая процессы массопереноса при биологической коррозии бетона [14, 26, 27]:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \text{Fo}_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad \text{Fo}_m > 0; \quad (3)$$

$$Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)|_{\text{Fo}_m=0} = \frac{C_0 - C(x, t)}{C_0} \Big|_{t=0} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{1}{\text{Bi}_m} \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(\text{Fo}_m) - Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)] \Big|_{\bar{x}=1}; \quad (6)$$

$$-\frac{\partial Z_{\text{liq}}(\text{Fo}_m)}{\partial \text{Fo}_m} = K_m \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1}; \quad (7)$$

$$K_m = \frac{m \cdot S \cdot \delta}{V_{\text{liq}}} \cdot \frac{\rho_{\text{con}}}{\rho_{\text{liq}}} = \frac{m \cdot G_{\text{con}}}{G_{\text{liq}}}, \quad (8)$$

где $\text{Fo}_m = k\tau/\delta^2$ — массообменный критерий Фурье; k — коэффициент массопроводности в твердой фазе, м²/с; τ — время, с; δ — толщина стенки конструкции, м; x — координата, м; $Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)$ — безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона; m — константа Генри, кг жидкости/кг бетона; $C(x, t)$ — концентрация «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени t в произвольной точке с координатой x , кг CaO /кг бетона; $Z_p(\text{Fo}_m) = (C_0 - C_p)/C_0$ — безразмерная равновесная концентрация на поверхности твердого тела; $C_p(t)$ — равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг CaO /кг бетона; $\text{Bi}_m = \beta^* \cdot \delta/k$ — массообменный критерий Био; β^* — модифицированный коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с; $Z_{\text{liq}}(\text{Fo}_m) = (C_0 - mC_{\text{liq}})/C_0$ — безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе; K_m — коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $\rho_{\text{con}}, \rho_{\text{liq}}$ — плотность бетона и жидкости соответственно, кг/м³; $G_{\text{con}}, G_{\text{liq}}$ — массы бетонного резервуара и жидкости, кг; $C_{\text{liq}}(t)$ — концентрация гидроксида кальция в жидкости, кг CaO /кг жидкости.

Влияние микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности в этой модели учитывается внутренним источником поглощения или высвобождения массы q_v , в частности «свободного гидроксида кальция», в бетонном цементном камне (ЦК).

Система уравнений (3)–(7) решалась методом интегральных преобразований Лапласа с переводом в область комплексных чисел и обратно в область оригиналов. Общее решение описывает динамику концентрационных полей в цементном камне:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \times \\ \times Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m \cdot \cos(\mu_m \bar{x})}{\psi'(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m) + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x}) \cdot \varphi(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^2 \cdot \psi'(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m)} \times \\ \times \exp(-\mu_m^2 Fo_m);$$

$$\varphi(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m) = (\mu_m^2 - \text{Bi}_m \cdot K_m) \times \\ \times \sin \mu_m - \mu_m \cdot \text{Bi}_m \cdot (\cos \mu_m - 1);$$

$$\psi'(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m) = [\mu_m^2 (3 + \text{Bi}_m) - \text{Bi}_m \cdot K_m] \times \\ \times \sin \mu_m + \mu_m [\mu_m^2 - \text{Bi}_m (K_m + 2)] \cdot \cos \mu_m;$$

$$\text{tg} \mu_m = \frac{\mu_m \cdot \text{Bi}_m}{\mu_m^2 - \text{Bi}_m \cdot K_m} \text{ — характеристическое уравнение.}$$

Уравнение (13) описывает кинетику массопереноса в жидкой фазе:

$$Z_{liq}(Fo_m) = Z_{liq}(0) + 2Bi_m \cdot K_m \times Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m)} \times [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1] - \\ - 2K_m \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m \cdot \varphi(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^3 \cdot \psi'(\text{Bi}_m, K_m, \mu_m)} \times [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1].$$

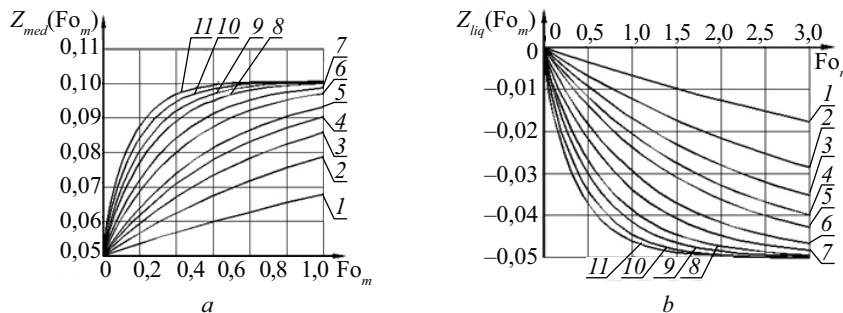


Рис. 1. Изменение средних безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» Z_{med} (a) и концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе Z_{liq} (b) от числа Фурье при $K_m = 0,5$, $Z_p(0) = 0,15$, и различных значениях числа Био Bi_m : 1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) 0,5; 6) 0,75; 7) 1; 8) 1,5; 9) 2; 10) 3; 11) 5

Fig. 1. Change in the average dimensionless concentrations of “free calcium hydroxide” Z_{med} (a) and the concentration of calcium hydroxide in the liquid phase Z_{liq} (b) from the Fourier number at $K_m = 0.5$, $Z_p(0) = 0.15$, with different values of the Bio number Bi_m : 1) 0.1; 2) 0.2; 3) 0.3; 4) 0.4; 5) 0.5; 6) 0.75; 7) 1; 8) 1.5; 9) 2; 10) 3; 11) 5

Полученные выражения (9) и (13) в совокупности позволяют рассчитать динамику массопереноса целевого компонента, в частности «свободного гидроксида кальция», из внутренних слоев бетона на границу раздела фаз «жидкая агрессивная среда – бетон», а также кинетику перехода этого компонента через границу раздела фаз и поступления в объем жидкости в железобетонном резервуаре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Степень влияния параметров массопереноса на интенсивность протекания микробиологической коррозии бетона оценивалась с помощью численного моделирования динамики и кинетики массовых процессов в системе. При этом процесс рассматривался в широком диапазоне величин критериев подобия (Фурье и Био) и значений коэффициента, учитывающего характеристики фаз рассматриваемой системы.

На рис. 1 показана интенсивность влияния коэффициента массоотдачи на массообмен. С увеличением значения критерия Био с течением времени процессы массопереноса в системе замедляются интенсивнее, достигаются равновесные значения концентраций гидроксида кальция в поровой жидкости ЦК и агрессивной среде.

Изменение вида линий на рис. 1 с линейного на экспоненциальный с повышением величины критерия Био свидетельствует об изменении механизма и закономерности массопереноса в системе «бетон – биопленка – жидкость». Графические зависимости показывают, что поступление гидроксида кальция в поровую жидкость бетона происходит интенсивнее, чем вывод его в жидкую среду. Равновесные концен-

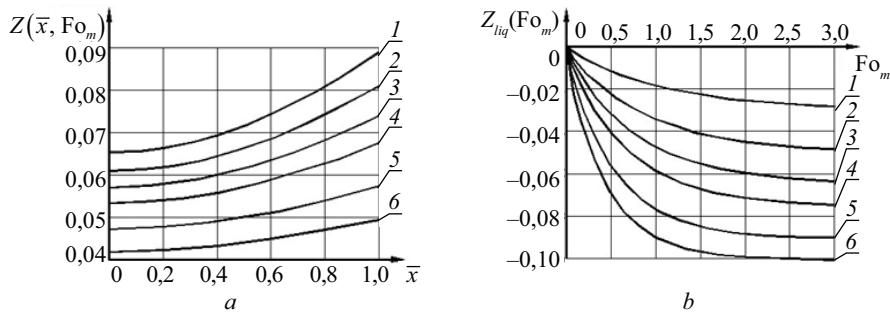


Рис. 2. Профиль безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» при $Fo_m = 1$ (a); изменение безразмерной концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе Z_{liq} от числа Фурье при $Z_p(0) = 0,15$, $B_{im} = 1$ (b) с различными значениями коэффициента, учитывающего характеристики фаз, K_m : 1) 0,25; 2) 0,5; 3) 0,75; 4) 1; 5) 1,5; 6) 2

Fig. 2. The profile of dimensionless concentrations of “free calcium hydroxide” at $Fo_m = 1$ (a); change in the dimensionless concentration of calcium hydroxide in the liquid phase Z_{liq} from the Fourier number at $Z_p(0) = 0,15$, $B_{im} = 1$ (b); with different values of the coefficient taking into account the characteristics of the phases K_m : 1) 0.25; 2) 0.5; 3) 0.75; 4) 1; 5) 1.5; 6) 2

трации в бетоне достигаются раньше, чем наступает равновесное состояние в жидкой фазе.

Из рис. 2 следует, что массообменные процессы протекают интенсивнее при увеличении значений коэффициента K_m , т.е. при больших значениях константы Генри или большей массе бетона, при меньшей массе жидкой среды. При значении числа Фурье, равном 1, с повышением величины коэффициента K_m в бетоне происходит снижение концентрации гидроксида кальция, о чем свидетельствует значительное уменьшение наклона линий на рис. 2, а. В жидкости при аналогичных параметрах наблюдается накопление выводимого компонента, а усиление прогиба кривых говорит о приведении системы к равновесному состоянию.

Отрицательные значения на шкале средней концентрации на рис. 1, b и рис. 2, b связаны с выводом гидроксида кальция из бетона в жидкость.

Результаты численного моделирования динамики массопереноса по толщине бетона представлены

на рис. 3–5. Определение различий в механизме массопереноса проводилось при трех значениях числа Био. Когда критерий Био равен 0,1 (рис. 3), внутренняя диффузия гидроксида кальция в бетоне лимитирует процессы переноса в рассматриваемой системе. На рис. 4 критерий Био равен 1, т.е. процесс ограничен внутренней диффузией и внешним массопереносом «свободного гидроксида кальция». Числу Био, равному 2, соответствует механизм внешнего массопереноса гидроксида кальция из бетона в жидкость (рис. 5).

Из рис. 3 следует, что при малых значениях числа Био его влияние на интенсивность массопереноса в ЦК бетона незначительно, поскольку профили концентраций переносимого компонента сохраняют свой вид. С течением времени происходит накопление гидроксида кальция в поровой жидкости бетона, но без ускорения процесса.

С повышением значений числа Био (рис. 4, 5) наблюдается замедление массопереноса с течением времени, изгиб профилей концентраций уменьшает-

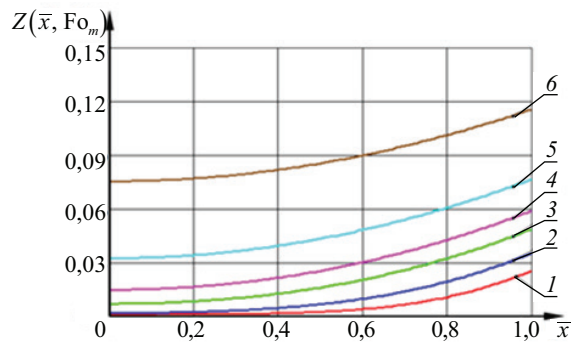


Рис. 3. Изменение безразмерных концентраций $Z(\bar{x}, Fo_m)$ по толщине бетонной конструкции при значении числа Био, равном 0,1, и числах Фурье: 1) 0,05; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,3; 5) 0,5; 6) 1; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

Fig. 3. Change in dimensionless concentrations $Z(\bar{x}, Fo_m)$ along the thickness of the concrete structure at the value of the Bio mass transfer number is 0.1 and Fourier numbers: 1) 0.05; 2) 0.1; 3) 0.2; 4) 0.3; 5) 0.5; 6) 1; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

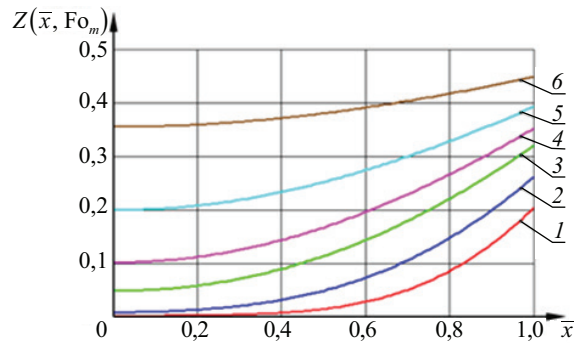


Рис. 4. Изменение безразмерных концентраций $Z(\bar{x}, Fo_m)$ по толщине бетонной конструкции при значении числа Био, равном 1, и числах Фурье: 1) 0,05; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,3; 5) 0,5; 6) 1; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

Fig. 4. Change in dimensionless concentrations $Z(\bar{x}, Fo_m)$ along the thickness of the concrete structure at the value of the Bio mass transfer number is 1 and Fourier numbers: 1) 0.05; 2) 0.1; 3) 0.2; 4) 0.3; 5) 0.5; 6) 1; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

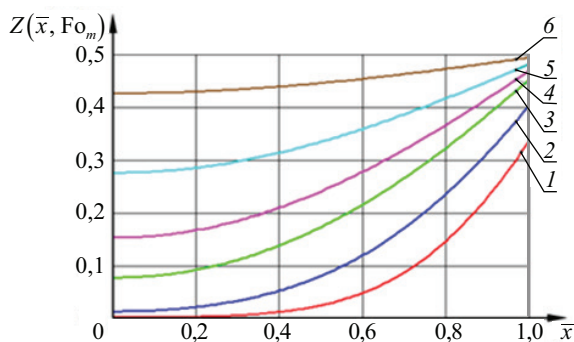


Рис. 5. Изменение безразмерных концентраций $Z(\bar{x}, Fo_m)$ по толщине бетонной конструкции при значении числа Био, равном 2, и числах Фурье: 1) 0,05; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,3; 5) 0,5; 6) 1; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

Fig. 5. Change in dimensionless concentrations $Z(\bar{x}, Fo_m)$ along the thickness of the concrete structure at the value of the Bio mass transfer number is 2 and Fourier numbers: 1) 0.05; 2) 0.1; 3) 0.2; 4) 0.3; 5) 0.5; 6) 1; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

ся, линии постепенно принимают вид прямой (линия 6). Однако достигаемые значения концентраций повышаются, значит, в целом поступление гидроксида кальция из структуры ЦК в поровую жидкость происходит интенсивнее.

Рис. 6 иллюстрирует влияние значений критерия подобия на изменение безразмерной концентрации «свободного гидроксида кальция» в жидкой фазе. Из рис. 6 можно сделать вывод, что в диапазоне значений числа Фурье от 0 до 1 в системе происходят наиболее интенсивные изменения, затем изменение концентрации в жидкой фазе достигает плато. Повышение величины критерия Био хоть и приводит к интенсификации поступления гидроксида кальция из бетона в жидкую среду, обуславливает более быстрое установление равновесной концентрации. Это коррелирует с данными, представленными линиями 6 на рис. 4, 5.

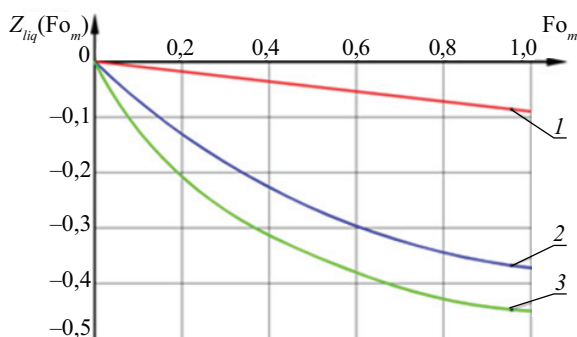


Рис. 6. Изменение безразмерных концентраций гидроксида кальция в жидкой фазе при значении массообменного числа Био: 1) 0,1; 2) 1; 3) 2; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

Fig. 6. Change of dimensionless concentrations of calcium hydroxide in the liquid phase at a value of the mass transfer number of Bio: 1) 0.1; 2) 1; 3) 2; $K_m = 1$; $Z_p(0) = 1$

Уровень развития компьютерных технологий позволяет получать математические модели сложных физико-химических процессов, в том числе характеризующих разрушение объектов под воздействием факторов внешней среды. Изучение таких моделей даст возможность в полной мере отразить основные процессы, происходящие при разрушении реального объекта, лучше понять природу явлений.

Построенные графические зависимости (рис. 1) демонстрируют линеинное изменение средней концентрации гидроксида кальция по толщине бетона при значениях числа Био до 0,5. Увеличение в 2–3 раза критерия Био оказывает сильное влияние на изменение градиента концентраций переносимого компонента в области малых значений. В области больших значений аналогичное увеличение числа Био не имеет такого же влияния на величину концентрации гидроксида кальция.

Содержание гидроксида кальция в поровом пространстве определяет стабильность основных компонентов ЦК, а его недостаток в поровом пространстве приводит к развитию коррозионных процессов. В результате воздействия микробиологической среды на бетон вещества взаимодействуют со «свободным гидроксидом кальция» в поровой жидкости ЦК, в результате чего усиливается процесс подачи $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в зону контакта бетона с агрессивной средой.

Полученные зависимости (рис. 1, 2) могут быть использованы для определения содержания гидроксида кальция в бетоне из экспериментальных данных. Это позволяет прогнозировать долговечность и надежность строительных конструкций с минимальной погрешностью.

При малых значениях числа Фурье коэффициент массопереноса, а следовательно, и критерий Био, который им определяется, имеют значительное влияние на динамику массопереноса (рис. 3–5).

Очевидна корреляция полученных в ходе численного моделирования графических зависимостей с представлениями о механизмах массообменных процессов в бетоне при микробиологической коррозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Математическое моделирование коррозии бетона является важным инструментом обеспечения и повышения долговечности изделий и сооружений. С помощью моделирования устанавливается вероятность возникновения повреждений бетона. Это позволяет своевременно назначать и применять средства защиты от коррозии бетонных изделий.

С помощью полученного решения задачи массопереноса возможно проводить расчет градиентов концентраций гидроксида кальция в бетоне в разные моменты срока службы изделия. Определяемые таким образом значения содержаний переносимого компонента дают возможность установить временные интервалы начала разложения высокоосновных

составляющих ЦК и определить сроки для выполнения мер по восстановлению и защите бетона.

Математическое описание интенсивности процессов коррозии бетона под воздействием микробиологической среды способствует более глубокому пониманию причин коррозии и служит основой для дальнейшей разработки единой количественной теории коррозии бетона и железобетона, позволяющей в соответствии с современными требованиями

прогнозировать долговечность изделий и конструкций, эксплуатируемых в средах различной степени агрессивности.

Рассмотрен простой и интересный случай биодеградации бетона, когда все изменения происходят в ограниченном объеме. Более сложные варианты массопереноса в бетоне при микробиологической коррозии будут исследованы в следующих работах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang C., Roy A., Silberschmidt V.V., Chen Z. Modelling of damage evolution in braided composites: recent developments // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2017. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.1186/s40759-017-0030-4
2. Gawin D., Koniorczyk M., Pesavento F. Modeling of hydro-thermo-chemo-mechanical phenomena in building materials // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. Issue 1. Pp. 51–63. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0004
3. Варламов А.А., Теличенко В.И., Римишин В.И. Модели материалов по теории деградации // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 4 (382). С. 59–65. EDN TRYMNG.
4. Kayumov R., Sulejmanov A., Strakhov D. Model of degradation of composite materials of building structure's load-bearing elements // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Pp. 239–249. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_26
5. Zhao L., Qin T., Zhang J., Chen Y. 3D gradual material degradation model for progressive damage analyses of unidirectional composite materials // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2015/145629
6. Kaźmierczak H. The dynamic characteristics of mechanical structures destruction // *Journal of Vibroengineering*. 2016. Vol. 18. Issue 8. Pp. 5230–5238. DOI: 10.21595/jve.2016.17717
7. Jia Y., Liu G., Gao Y., Pei J., Zhao Y., Zhang J. Degradation reliability modeling of stabilized base course materials based on a modulus decrement process // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 177. Pp. 303–313. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.129
8. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Обобщенные модели долговечности и их применение для решения задач прогнозирования определяющих характеристик композитов // *Механика композитных материалов*. 2022. Т. 58. № 3. С. 505–520. DOI: 10.22364/mkm.58.3.03. EDN BZFLLD.
9. Петров В.В., Мищенко Р.В., Пименов Д.А., Горбачева О.А. Математическое моделирование долговечности тонкостенных пространственных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 6 (9). С. 14–30. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10052. EDN ASQBRG.
10. Васильев А.А., Долomanюк Р.Ю., Дашкевич С.В. Модель прогнозирования долговечности железобетонных пролетных строений мостов // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2018. № 1 (36). С. 121–123. EDN YWIIICL.
11. Bastidas-Arteaga E. Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-018-0235-x
12. German M., Pamin J. Numerical simulation of non-uniformly distributed corrosion in reinforced concrete cross-section // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 14. P. 3975. DOI: 10.3390/ma14143975
13. Shodja H.M., Kiani K., Hashemian A. A model for the evolution of concrete deterioration due to reinforcement corrosion // *Mathematical and Computer Modelling*. 2010. Vol. 52. Issue 9–10. Pp. 1403–1422. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.05.023
14. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Особенности биодеградации гидротехнических бетонов // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. № 1. С. 45–55. EDN UPWQJY.
15. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В. Методы математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких агрессивных средах : монография. М. : Изд-во АСВ, 2021. 244 с. EDN QRKKFL.
16. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С., Манохина Ю.В., Шестеркин М.Е. Особенности математического моделирования массопереноса при коррозии бетона второго вида. Решение для малых чисел Фурье // *Строительные материалы*. 2012. № 3. С. 11–13. EDN OYDWYN.
17. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 7 (83). Pp. 198–207. DOI: 10.18720/MCE.83.18. EDN SIZQZP.

18. AL-Ameeri A.S., Rafiq M.I., Tsioulou O. Influence of carbonation on the resistance of concrete structures to chloride penetration and corrosion // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 289. P. 08001. DOI: 10.1051/mateconf/201928908001
19. Wan X., Wittmann F.H., Zhao T., Fan H. Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation // Journal of Zhejiang University SCIENCE A. 2013. Vol. 14. Issue 1. Pp. 71–78. DOI: 10.1631/jzus.A1200187
20. Pu Q., Jiang L., Xu J., Chu H., Xu Y., Zhang Y. Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 28. Issue 1. Pp. 519–524. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.09.006
21. Баженов Ю.М. Технология бетона : учебник. М. : Изд-во АСВ, 2011. 524 с.
22. Makhlof A.S.H., Aliofkhaezrai M. Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2015. 470 p.
23. Nevares I., del Alamo-Sanza M. Characterization of the oxygen transmission rate of new-ancient natural

- materials for wine maturation containers // Foods. 2021. Vol. 10. Issue 1. P. 140. DOI: 10.3390/foods10010140
24. Степанова В.Ф. Долговечность бетона. Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 124 с. EDN FRCPMF.
25. Ali W., Urgessa G. Computational model for internal relative humidity distributions in Concrete // Journal of Computational Engineering. 2014. Vol. 2014. Pp. 1–7. DOI: 10.1155/2014/539850
26. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A. Mathematical model of mass transfer processes in biological corrosion of cement concretes // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052059. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052059
27. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Математическое моделирование массопереноса в системе цементный бетон – жидкая среда, лимитируемого внутренней диффузией переносимого компонента при жидкостной коррозии первого вида // Строительные материалы. 2021. № 7. С. 4–9. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-793-7-4-9. EDN LEJMD.

Поступила в редакцию 3 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 января 2024 г.

Одобрена для публикации 8 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Викторович Федосов** — доктор технических наук, профессор кафедры технологий и организации строительного производства, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

Борис Евгеньевич Нармания — аспирант кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 932757, Scopus: 57215532142, ResearcherID: HKP-1695-2023, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Wang C., Roy A., Silberschmidt V.V., Chen Z. Modelling of damage evolution in braided composites: recent developments. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2017; 3(1). DOI: 10.1186/s40759-017-0030-4
2. Gawin D., Koniorczyk M., Pesavento F. Modeling of hydro-thermo-chemo-mechanical phenomena in building materials. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013; 61(1):51-63. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0004
3. Varlamov A.A., Telichenko V.I., Rimshin V.I. Models materials in the theory of degradation. *Textile Industry Technology (Series: "Proceedings of Higher*

- Educational Institutions")*. 2019; 4(382):59-65. EDN TRYMNG. (rus.).
4. Kayumov R., Sulejmanov A., Strakhov D. Model of degradation of composite materials of building structure's load-bearing elements. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 239-249. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_26
5. Zhao L., Qin T., Zhang J., Chen Y. 3D gradual material degradation model for progressive damage analyses of unidirectional composite materials. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015; 2015:1-11. DOI: 10.1155/2015/145629
6. Kaźmierczak H. The dynamic characteristics of mechanical structures destruction. *Journal of Vibro-*

engineering. 2016; 18(8):5230-5238. DOI: 10.21595/jve.2016.17717

7. Jia Y., Liu G., Gao Y., Pei J., Zhao Y., Zhang J. Degradation reliability modeling of stabilized base course materials based on a modulus decrement process. *Construction and Building Materials*. 2018; 177:303-313. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.129

8. Gusev E.L., Bakulin V.N. Generalized durability models and their application to solving problems on predicting the defining characteristics of composites. *Mechanics of Composite Materials*. 2022; 58(3):505-520. DOI: 10.22364/mkm.58.3.03. EDN BZFLLD. (rus.).

9. Petrov V.V., Mishchenko R.V., Pimenov D.A., Gorbacheva O.A. Mathematical modeling of longevity thin-walled spatial constructions interacting with the aggressive environment. *Expert: Theory and Practice*. 2020; 6(9):14-30. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10052. EDN ASQBRG. (rus.).

10. Vasilyev A.A., Dolomanjuk R.Yu., Dashkevich S.V. Model of prediction of longevity of reinforce-concrete flight structures of bridges and overpasses. *Bulletin of BSUT: Science and Transport*. 2018; 1(36):121-123. EDN YWIICL. (rus.).

11. Bastidas-Arteaga E. Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018; 12(1). DOI: 10.1186/s40069-018-0235-x

12. German M., Pamin J. Numerical simulation of non-uniformly distributed corrosion in reinforced concrete cross-section. *Materials*. 2021; 14(14):3975. DOI: 10.3390/ma14143975

13. Shodja H.M., Kiani K., Hashemian A. A model for the evolution of concrete deterioration due to reinforcement corrosion. *Mathematical and Computer Modelling*. 2010; 52(9-10):1403-1422. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.05.023

14. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Loginova S.A. Biodegradation of hydrotechnical concrete. *Smart Composites in Construction*. 2020; 1(1):45-55. EDN UPWQJY. (rus.).

15. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V. *Methods of mathematical physics in applications to the problems of concrete corrosion in liquid aggressive media : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 244. EDN QRKKFL. (rus.).

16. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Kasyanenko N.S., Manohina Yu.V., Shestorkin M.E. Features of mathematical modeling of mass transfer during corrosion of concrete of the second type. Solution for small

Fourier numbers. *Construction Materials*. 2012; 3:11-13. EDN OYDWYH. (rus.).

17. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 7(83):198-207. DOI: 10.18720/MCE.83.18. EDN SIZQZP.

18. AL-Ameeri A.S., Rafiq M.I., Tsioulou O. Influence of carbonation on the resistance of concrete structures to chloride penetration and corrosion. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 289:08001. DOI: 10.1051/mateconf/201928908001

19. Wan X., Wittmann F.H., Zhao T., Fan H. Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2013; 14(1):71-78. DOI: 10.1631/jzus.A1200187

20. Pu Q., Jiang L., Xu J., Chu H., Xu Y., Zhang Y. Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete. *Construction and Building Materials*. 2012; 28(1):519-524. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.09.006

21. Bazhenov Yu.M. *Technology of concrete : textbook*. Moscow, ASV Publ., 2011; 524. (rus.).

22. Makhlof A.S.H., Aliofkharzai M. *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2015; 470.

23. Nevares I., del Alamo-Sanza M. Characterization of the oxygen transmission rate of new-ancient natural materials for wine maturation containers. *Foods*. 2021; 10(1):140. DOI: 10.3390/foods10010140

24. Stepanova V.F. *Durability of concrete*. Vologda, Infra-Inzheneriya, 2023; 124. EDN FRCPMF. (rus.).

25. Ali W., Urgessa G. Computational Model for internal relative humidity distributions in concrete. *Journal of Computational Engineering*. 2014; 2014:1-7. DOI: 10.1155/2014/539850

26. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A. Mathematical model of mass transfer processes in biological corrosion of cement concretes. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052059. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052059

27. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Mathematical modeling of mass transfer in the "cement concrete-liquid medium" system, limited by the internal diffusion of the transferred component at liquid corrosion of the first type. *Construction Materials*. 2021; 7:4-9. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-793-7-4-9. EDN LEJMD. (rus.).

Received December 3, 2023.

Adopted in revised form on January 20, 2024.

Approved for publication on February 8, 2024.

B I O N O T E S: **Sergey V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Academician of RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 105900, Scopus: 7005670404, Researcher ID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

Boris E. Narmaniya — postgraduate student of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 932757, Scopus: 57215532142, ResearcherID: HKP-1695-2023, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 551.3.053

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617

Исследование оползневой процесса в условиях сезонномерзлых грунтов (оползневый склон долины р. Воркута)

Анна Николаевна Вихоть

Институт геологии федерального научного центра Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук имени академика Н.П. Юшкина (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН);
г. Сыктывкар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В свете последних тенденций таяния многолетнемерзлых толщ состояние криолитозоны отмечается как неустойчивое, поэтому широко распространены такие экзогенные геологические процессы, как оползни.

Материалы и методы. Проведен анализ оползневой процесса в долине р. Воркута вблизи территории жилой застройки в условиях сезонномерзлых грунтов. По результатам вертикального электрического зондирования представлен геоэлектрический разрез у бровки оползневой срыва. Осуществлены статистические расчеты по геодезическим данным, трансформация временного ряда смещения оползня к стационарному виду методом детрендринга, корреляционный анализ.

Результаты. Определены тренды временных рядов по точкам смещений. Они имели квадратичное распределение. Все исследуемые ряды обладали сильной детерминацией. Проверка компонент на стационарность и распределение по нормальному закону выполнялись по оценке математических ожиданий параметров детрендрингованных рядов. Краткосрочный прогноз оползневой процесса на один период был дан по критериям стандартной квадратичной модели регрессии, приведен график прогноза. По критерию Колмогорова – Смирнова принята гипотеза об однородности распределения одиночного ряда для климатических параметров за период наблюдений. Коэффициенты корреляции параметров смещения бровки оползневой уступа и некоторых климатических факторов по шкале Чеддока находились в диапазоне от обратной слабой (–0,18) до значительной (0,58) корреляции.

Выводы. Представлено два возможных случая развития оползневой процесса: пассивная стадия и выколаживание склона или начало нового цикла. Для установления достоверного прогноза необходимо вести геодезический мониторинг. За период наблюдений отмечено незначительное повышение среднегодовой температуры воздуха. Выявлена тесная взаимосвязь оползневых смещений и среднего значения температуры воздуха месяцев с положительными значениями, $K_{\text{кор}} = 0,58$. Умеренная связь ($K_{\text{кор}} = 0,5$) — со среднегодовым количеством осадков. Предложены инженерные рекомендации для стабилизации склона: установка теплоизоляционных экранов на глубину сезонного промерзания грунтов, обустройство дренажных колодцев в теле оползня и в грунтах выше по склону.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сезонномерзлые грунты, оползень, цикл наблюдений, квадратичный тренд, климатические параметры, корреляция, вертикальное электрическое зондирование

Благодарности. Автор выражает благодарность В.А. Лютоеву за проведение полевых работ и Геоэкологической службе Республики Коми за предоставленные данные.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Вихоть А.Н. Исследование оползневой процесса в условиях сезонномерзлых грунтов (оползневый склон долины р. Воркута) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 606–617. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617

Автор, ответственный за переписку: Анна Николаевна Вихоть, vikhota.anna@mail.ru.

Study of the landslide process in conditions of seasonally frozen soils (landslide slope of the Vorkuta river valley)

Anna N. Vikhot

Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS); Syktuykar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In view of recent trends in melting of permafrost strata, the state of cryolithozone is noted as unstable, so such exogenous geological processes as landslides are widespread.

Materials and methods. The landslide process in the Vorkuta River valley near the residential area under the conditions of seasonally frozen soils was analyzed. Based on the results of vertical electrical sounding, a geoelectric section at the landslide failure edge is presented. Statistical calculations based on geodetic data, transformation of landslide displacement time series to stationary form by detrending method, correlation analysis were carried out.

Results. Trends of time series on displacement points were determined. They had a quadratic distribution. All investigated series had strong determinacy. The components were checked for stationarity and distribution according to the normal law by estimation of mathematical expectations of the detrended series parameters. Short-term forecast of landslide process for one period was given by the criteria of standard quadratic regression model, the forecast graph is given. According to Kolmogorov–Smirnov criterion, the hypothesis of homogeneity of single series distribution for climatic parameters for the observation period was accepted. The correlation coefficients of the parameters of landslide scarp displacement and some climatic factors on the Chaddock scale ranged from inverse weak (-0.18) to significant (0.58) correlation.

Conclusions. Two possible cases of the landslide movement were presented: passive stage and the slope flattening or the beginning of a new landslide cycle. Geodetic monitoring is necessary to establish a reliable forecast. The average annual air temperature increased slightly during the observation period. A close relationship between landslide displacements and the positive average monthly air temperature values was revealed, $K_{cor} = 0.58$. A moderate connection ($K_{cor} = 0.5$) — with the average annual precipitation. Engineering recommendations for slope stabilization are proposed: installation of heat-insulating screens to the depth of seasonal soil freezing, arrangement of drainage wells in the body of the landslide and in soils up the slope.

KEYWORDS: seasonally frozen soils, landslide, time series, quadratic trend, climatic parameters, correlation, vertical electrical sounding

Acknowledgements. The author expresses gratitude to V.A. Lyutov for conducting field work and the Geocryological Service of the Komi Republic for the provided data.

FOR CITATION: Vikhot A.N. Study of the landslide process in conditions of seasonally frozen soils (landslide slope of the Vorkuta river valley). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):606-617. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617 (rus.).

Corresponding author: Anna N. Vikhot, vikhot.anna@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Криолитозона охватывает 24 % площади суши Северного полушария, в том числе около 50 % в России, занимая примерно 64 % территории страны [1]. На Европейском Севере России динамика глубины сезонного протаивания зависит от изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова: с увеличением данных параметров растут и показатели температурного поля оттаивающих грунтов. Данные тренды оценены методами статистического анализа [2].

Район исследований, г. Воркута, расположен в южной тундре, в области голоценовой и голоценово-плейстоценовой криолитозоны с залеганием ее подошвы на глубине 100 м и чуть более [3], представленной прерывистым неоднородным распространением многолетнемерзлых грунтов (10–50 % покрытия) [4]. В этой зоне геологическая среда обладает сильной чувствительностью к изменениям климата и техногенной нагрузке. В свете последних тенденций таяния многолетнемерзлых толщ состояние криолитозоны здесь отмечается как неустойчивое [5, 6], поэтому широко распространены экзогенные геологические процессы и явления, в частности опасные и катастрофические (оползни, обвалы), криогенное выветривание, а именно промерзание и оттаивание с образованием сезонноталого и сезонномерзлого слоев грунтов (термоэрозия, криопэги, морозобойное растрескивание, солифлюкция, морозное пучение).

В районе исследований особого внимания заслуживает оползневый процесс на территории жилой застройки. В настоящее время широко используются количественные методы определения оползневой опасности. Исследование с помощью этих методов состоит из двух основных элементов:

анализ пространственной и временной вероятности оползня, что связано с величиной смещения грунта, периодом повторяемости и возникновения смеще-

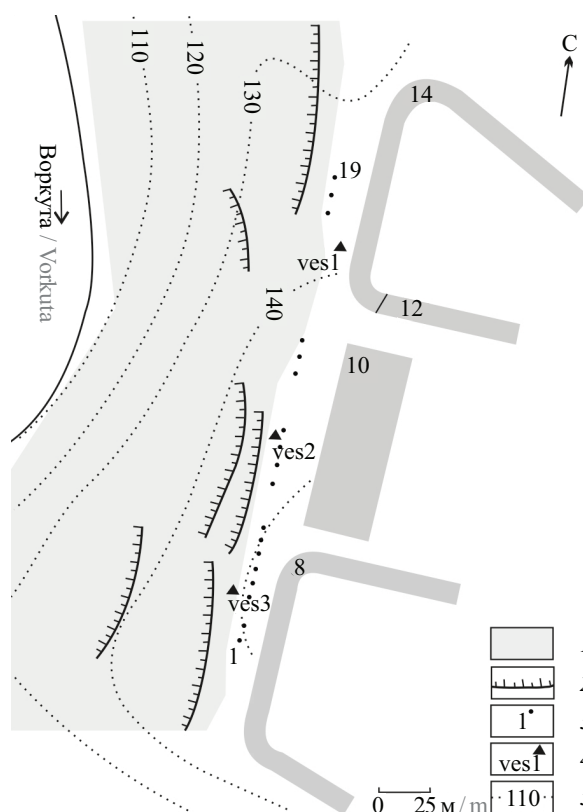


Рис. 1. Схема района исследований: 1 — оползневый участок; 2 — бровка оползневой срыва; 3 — геодетический репер; 4 — пикет вертикального электрического зондирования; 5 — абсолютная высота

Fig. 1. Scheme of the research area: 1 — landslide area; 2 — landslide failure edge; 3 — geodetic reference; 4 — vertical electrical sensing picket; 5 — absolute height

ния [7]. При оценке площадного распространения оползней и прогнозе динамики оползневых процессов в пространстве и во времени применяются статистические методы обработки данных. Когда оползневый процесс рассматривается как простейший поток событий, временная вероятность процесса рассчитывается, например, с помощью распределения Пуассона [8]. Также применяются космоснимки в разных зонах спектра (инфракрасной, радиоволновой, ультрафиолетовой) [9–11]. Для определения доминирующей составляющей при корреляционном анализе оползневого процесса статистически независимые пространственные значения вероятности могут определяться, например, методом мультирегрессионного анализа, взвешенной дисперсии и I Морана [12]. Геодезические наблюдения заключаются в получении пространственно-координированных сведений посредством электронно-оптических и лазерно-сканирующих приборов и позволяют точно оценить геометрические параметры оползня, прогнозировать смещение оползня с помощью традиционных математических расчетов. В результате таких расчетов методом регрессионного анализа строится прогнозная модель оползневого процесса. С точки зрения теории слу-

чайных функций смещение оползня представляется как случайная величина, и анализ процесса происходит методом исследования согласно этой теории [13]. Если временной ряд является однородным и стационарным, то анализ оползневого процесса и прогнозирование становятся возможными.

Цель работы — исследование динамики движения оползня в долине р. Воркута в условиях сезонно-мерзлых грунтов и ее взаимосвязей с климатическими параметрами.

Объект исследования

Детальное исследование оползневого процесса было проведено на оползневом склоне в долине р. Воркута, примыкающей к седьмому жилому микрорайону в районе ул. Шахтерская набережная (г. Воркута). Первая и основная закономерность рассматриваемого вида природной опасности состоит в том, что она никогда не может быть ликвидирована полностью. Это связано с тем, что часть геологической среды, вовлеченной в техносферу, служит источником техногенного существования и развития. Опасность процесса заключается в том, что бровка срыва подбирается к дому № 10 по ул. Шахтерская набережная (рис. 1).

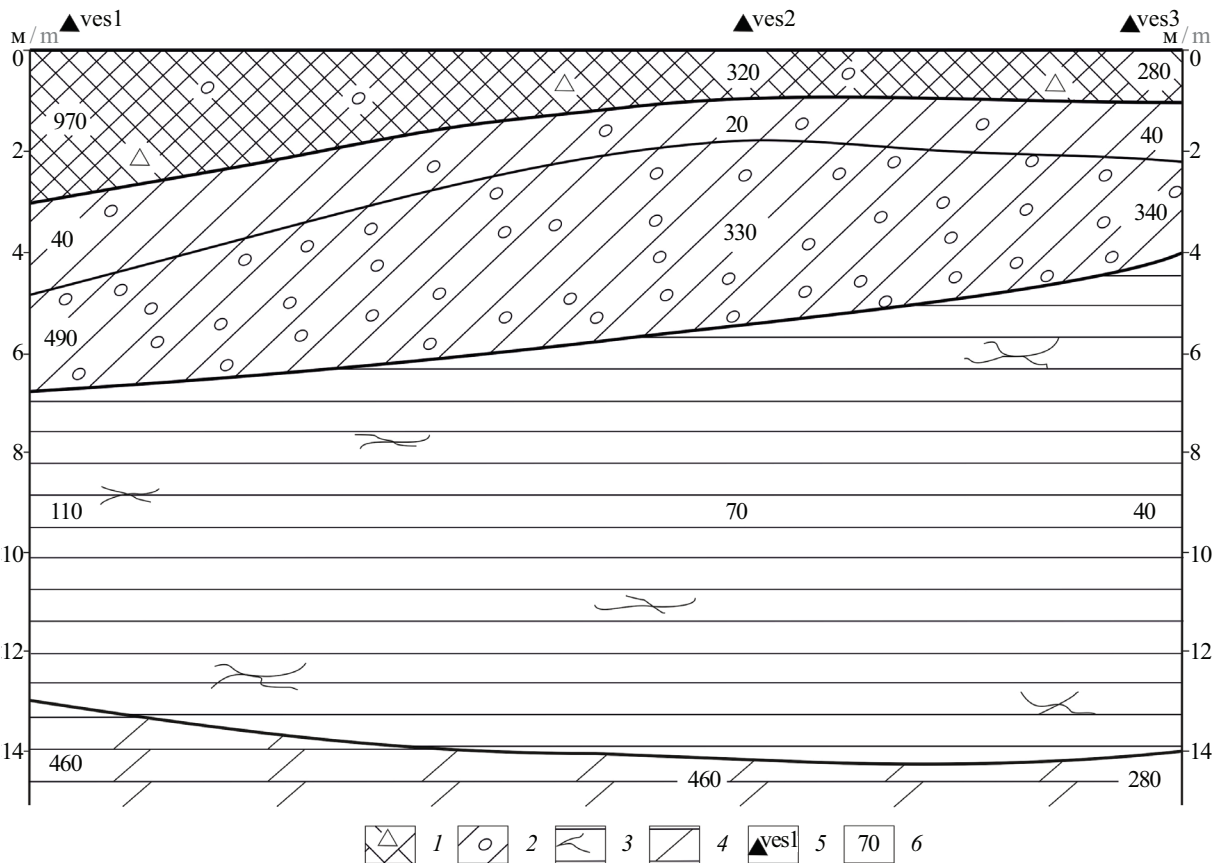


Рис. 2. Геоэлектрический разрез у бровки оползневого срыва: 1 — насыпные грунты; 2 — суглинки с включениями гравия и гальки; 3 — трещиноватые полускальные отложения; 4 — скальные породы; 5 — пикет вертикального электрического зондирования; 6 — удельное электрическое сопротивление, Ом·м

Fig. 2. Electrical model of the landslide margin: 1 — fill-up ground; 2 — loam and alluvium; 3 — crumbling semi-rocky deposits; 4 — hard-rocks; 5 — picket of vertical electrical sounding; 6 — electrical resistivity, Ohm·m

ния вектора смещения в пространстве для каждого репера.

Комплексная взаимосвязь климатических факторов и динамики оползневого процесса определена с помощью расчетов коэффициента корреляции и выявления прямой или обратной закономерности изменения параметров.

Литологический состав и мощность геологических горизонтов были уточнены методом электроразведки (вертикального электрического зондирования) с расстановкой Шлюмберже. Метод вертикального электрического зондирования, как малоглубинный метод электроразведки, давно зарекомендовал себя в изучении природных и техногенных оползневых процессов у отечественных и иностранных исследователей [16–21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные наблюдений 2014–2019 гг. представлены в табл. 1. На рис. 3 годовые графики отображают движение геодезических точек в виде составляющих модулей значений во времени. В центральной части бровки движение неравномерно, что косвенно подтверждает циклический оползневый процесс: стадия подготовки (до 2014–2015 гг.), представленная малыми смещениями, предшествовала стадии основного смещения и вторичных смещений (2016–2019 гг.). На графике движения каждой точки (примеры на рис. 4) временной ряд имеет тренд, ряды не являются стационарными, поэтому для построения математической модели краткосрочного прогноза движения бровки главного уступа оползневого тела необходимо привести каждый ряд к стационарному виду методом детрендривирования. Стационарный относительно тренда временной ряд x_t имеет следующее представление:

$$x_t = f(t) + u_t,$$

где $f(t)$ — детерминированная функция (тренд); u_t — стационарный ряд («белый шум»), удовлетворяющий теореме Гаусса – Маркова.

Для этого необходимо определить тип тренда, получить аналитическое уравнение тренда, установить коэффициент детерминации R^2 .

В результате аппроксимации временного ряда каждой точки получили, что временные ряды стационарны относительно некоторого детерминированного квадратичного тренда (полинома второй степени) (рис. 4, табл. 2). Это означает, что они относятся к группе TS-рядов. Однако заключение о стационарности полученных данных требует проверки. На этапе определения тренда все исследуемые ряды обладают сильной детерминацией, неприемлемые для анализа коэффициенты детерминации R^2 отсутствуют: диапазон рассчитанных коэффициентов составил 0,5–0,9.

В табл. 3 приведены полученные по формуле данные детрендривирования в виде компонент временной последовательности u_t . Проверка компонент на стационарность и распределение по нормальному закону заключается в оценке математических ожиданий по формуле:

$$\overline{Mx} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Все рассчитанные математические ожидания равны нулю (табл. 3), следовательно, ряды стационарны и к моделям квадратичных трендов можно применять выводы стандартной квадратичной модели регрессии.

Общий вид модели квадратичного тренда задается уравнением:

$$x_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + v_t,$$

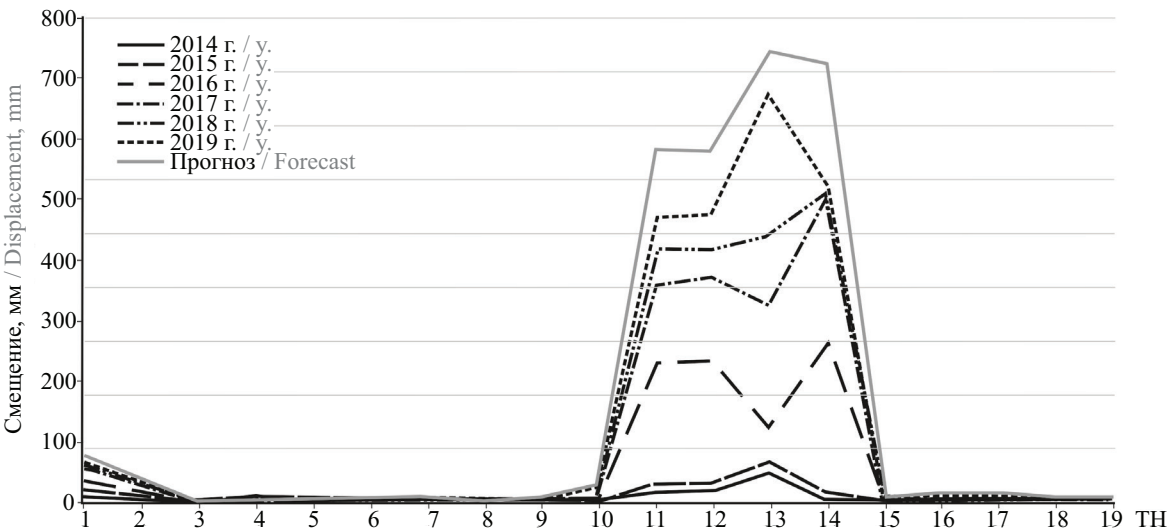


Рис. 3. Динамика движения оползневого тела

Fig. 3. Dynamics of landslide body movement

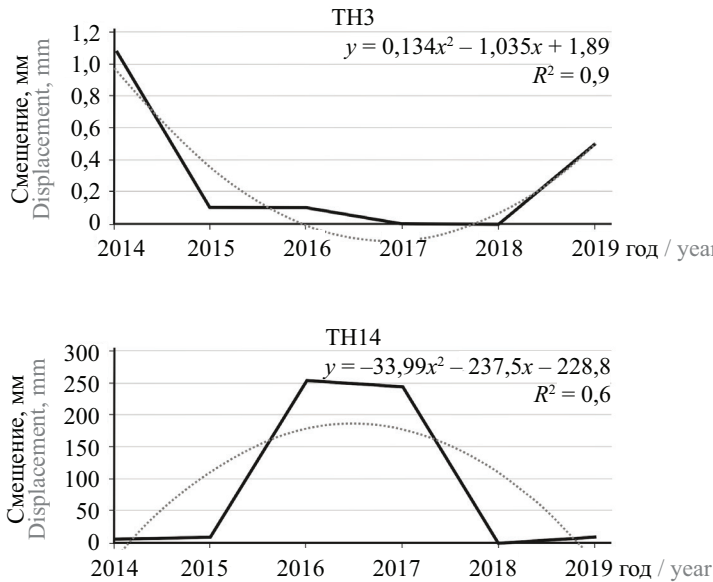


Рис. 4. Графики смещения точек оползневого тела и аппроксимирующих функций

Fig. 4. Graphs of landslide body point displacement and approximating functions

где β_0 — начальный уровень ряда; β_1 — средняя скорость изменения уровня ряда; β_2 — коэффициент ускорения изменения уровня ряда.

Из табл. 2 известны все значения коэффициентов тренда, поэтому можно дать трактовку и краткосрочный прогноз на один период динамики оползневой процесса (движению бровки оползневого срыва):

- при $\beta_2 > 0$ и вогнутом параболическом тренде процесс характеризуется в нисходящей части как снижение значений во времени с замедлением, в восходящей части — рост с ускорением;
- при $\beta_2 < 0$ и выпуклом параболическом тренде процесс в восходящей части представлен ростом параметра с замедлением, в нисходящей части — снижением с ускорением.

Табл. 2. Параметры аппроксимации временных рядов

Table 2. Time series approximation parameters

Точка наблюдений Observation point	Уравнение тренда $f(t)$ Trend equation $f(t)$	Коэффициент детерминации R^2 Determination coefficient R^2
1	$-1,262x^2 + 8,268x + 2,09$	0,7
2	$-0,555x^2 + 3,421x + 2,43$	0,7
3	$0,134x^2 - 1,035x + 1,89$	0,9
4	$0,008x^2 - 0,136x + 0,61$	0,65
5	$0,155x^2 - 1,61x + 4,33$	0,9
6	$0,035x^2 - 0,39x + 1,24$	0,85
7	$0,271x^2 - 1,845x + 3,36$	0,7
8	$0,121x^2 - 0,995x + 1,96$	0,8
9	$-0,187x^2 + 1,446x - 1,07$	0,5
10	$0,055x^2 + 0,569x + 1,55$	0,7
11	$-18,96x^2 + 139,4x - 121,9$	0,5
12	$-18,29x^2 + 134,3x - 113,5$	0,5
13	$4,285x^2 + 8,754x + 16,56$	0,7
14	$-33,99x^2 + 237,5x - 228,8$	0,6
15	$0,225x^2 - 1,32x + 2,16$	0,8
16	$-0,637x^2 + 4,393x - 4,01$	0,55
17	$-0,48x^2 + 3,691x - 3,65$	0,55
18	$-0,046x^2 + 0,65x - 0,64$	0,5
19	$-0,182x^2 + 1,289x - 1,2$	0,8

По результатам анализа соотношений данных табл. 2 и графиков тренда получены выводы:

- по типу движения бровки оползневого уступа область размещения реперов делится на северную (ПН16-19), центральную (ПН9-14) и южную (ПН3-8) части;
- центральная часть характеризуется обвально-осыпным процессом в период 2013–2017 гг. с последующим этапом стабилизации склона (2018–2019 гг.);
- в тот же период 2013–2017 гг. южная часть бровки оползневого уступа также характеризуется активной стадией оползания, но с наименьшей скоростью, поэтому возможно отнести оползневый процесс в этой части к группе механизма оползня скольжения; стадия затухания и стабилизации началась в 2018 г.;
- в первой части периода наблюдений северная часть имела подготовительный этап, описываемый по трендам ПН16-19 снижением значений; стоит отметить, что этот этап выражен неявно и заканчивается в 2017–2018 гг., далее тренды переходят в стадию роста с невысоким ускорением, следовательно, с некоторой вероятностью можно утверждать о начале активной стадии оползня в этой части склона.

Прогнозные значения по трендам на один период представлены в виде кривой на рис. 3. При условии сохранения формы правой нисходящей ветви трендов и стремлении значений смещения к нулю в центральной и южной части участка исследова-

ний можно будет сделать заключение о процессе выполаживания склона. Возможен случай, когда модель придет к своему экстремуму и начнет движение в противоположную сторону. Таким образом, можно будет сделать заключение о начале нового цикла оползневого процесса. Тогда процесс будет описываться полиномом степенью больше второй и тенденция прогнозирования, возможно, будет иметь более высокую степень ошибки при хорошо аппроксимированном ряде.

Исследования взаимосвязи климатических причин возникновения и активизации оползней статистическими методами ведутся на протяжении нескольких последних десятилетий. Корреляции иногда высокие и тесно связаны во времени, иногда неудовлетворительны и отдалены [22]. При оценке степени влияния климатических параметров (температуры воздуха, осадков, мощности снежного покрова) на ежегодные показатели вектора смещения оползневого тела были использованы данные метеостанции г. Воркута (табл. 4) за 2014–2019 гг.

Среднегодовая температура воздуха по метеостанции г. Воркута (2014–2019 гг.) составила –3,88 °С, среднее значение отрицательных среднесуточных температур воздуха –11,26 °С, положительных +9,16 °С, среднегодовое количество осадков 549 мм. В период наблюдений отмечается незначительное повышение среднегодовых температур (коэффициент линейной регрессии для отрицательных зна-

Табл. 3. Параметры детрендрованных рядов u_r , мм

Table 3. Parameters of detrended series u_r , mm

Точка наблюдений Observation point	Год наблюдений Observation year						$\bar{M}$
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
1	–0,9	1,5	–0,9	2,6	–4,1	1,8	0,0
2	0,3	–0,48	–0,8	2,1	–1,45	0,35	0,00
3	0,11	–0,26	0,11	0,1	–0,06	0	0,00
4	–0,08	0,13	0,02	–0,01	–0,15	0,09	0,00
5	–0,35	0,75	–0,2	–0,29	–0,05	0,15	0,00
6	0,12	–0,2	0	0,05	0,12	–0,08	0,00
7	0,42	–0,65	–0,07	–0,01	0,78	–0,45	0,00
8	0,22	–0,35	–0,06	0,18	0,18	–0,16	0,00
9	0,2	–0,29	0,01	–0,5	1,03	–0,45	0,00
10	1	–1,6	–0,4	0,5	1,45	–0,95	0,00
11	16,5	–66,7	76,6	–4	–40,3	18,2	0,0
12	18,7	–70,7	74,5	9,5	–53,2	21,2	0,0
13	19,3	–35,3	–24,8	82,8	–52,7	10,9	0,0
14	31,8	–100,5	74,4	64,9	–107	36,6	0,0
15	–0,35	0,57	0,19	–0,38	–0,29	0,28	0,00
16	0,64	–2	1,48	1,2	–2	0,7	0,00
17	0,82	–0,8	–1,4	0,7	1,9	–1,2	0,00
18	0,05	–0,47	0,8	0,09	–0,85	0,4	0,00
19	0,1	–0,25	0,07	0,36	–0,4	0,12	0,00

Табл. 4. Климатические параметры, г. Воркута, и коэффициенты корреляции со смещением оползневого тела
Table 4. Climatic parameters, Vorkuta, and correlation coefficient with landslide body displacements

Год Year	$t_{\text{ср.в}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{м.а}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ср+в}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{м+а}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ср-в}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{м-а}}, ^\circ\text{C}$	Годовое количество осадков, мм Annual rainfall, mm	$h_{\text{ср.сн.пок}}, \text{мм}$ $h_{\text{м.сн}}, \text{мм}$	$h_{\text{макс сн.пок}}, \text{мм}$ $h_{\text{макс сн}}, \text{мм}$
2014	–5,62	7,60	–12,23	517	42,9	99
2015	–3,88	6,63	–11,39	464	51,4	130
2016	–1,61	11,62	–11,06	424	13,1	37
2017	–3,57	9,78	–10,25	516	36,8	91
2018	–4,49	10,45	–11,96	733	43,8	95
2019	–4,13	8,88	–10,64	639	71,3	158
D_n	0,350	0,417	0,350	0,356	0,389	0,350
$\frac{K_{\text{кор}}}{K_{\text{кор}}}$	0,18	0,58	0,35	0,5	–0,14	–0,18

чений положителен, коэффициент детерминации $R^2 = 0,25$). По этим значениям самым теплым годом стал 2016 г., ему соответствует минимальное годовое количество осадков и высота снежного покрова. По средним значениям суммы отрицательных температур самым теплым годом оказался 2017 г., суммы положительных температур 2016 г. На диапазон среднегодовых температурных параметров оказали несколько большее влияние среднемесячные температуры воздуха с отрицательными значениями (коэффициент линейной регрессии $\beta_1 = 0,201$; $R^2 = 0,25$), чем с положительными ($\beta_1 = 0,457$; $R^2 = 0,22$), следовательно, повышение среднегодовых температур заключается в более теплых месяцах с отрицательной температурой воздуха.

Для расчета коэффициентов корреляции смещение бровки оползневого уступа принималось за зависимую переменную, климатические показатели — за независимые переменные. По критерию Колмогорова – Смирнова проведена проверка гипотезы об однородности распределения одиночного ряда для анализируемых климатических параметров путем определения максимального модуля разности накопленных величин:

$$K_n = \max|f_n(x) - f_0(x)|.$$

По результатам вычисления критерия $D_n = \sqrt{n} \cdot K_n$ (табл. 4) получили, что по таблице распределения критерия для $\varepsilon = 0,01$ выполнено необходимое условие для корреляционного анализа: каждый ряд данных подчиняется нормальному закону распределения $D_n > D_{\text{крит}}$, $D_{\text{крит}} = 0,618$.

Коэффициенты корреляции параметров смещения бровки оползневого уступа и таких климатических факторов, как среднегодовая температура воздуха, среднее значение температуры воздуха месяцев с отрицательной и положительной температурой воздуха, годовое количество осадков, средняя и максимальная высота снежного покрова, по шкале Чеддока оказались в диапазоне от обратной слабой (–0,18) до значительной (0,58). Наиболее высокий коэффициент (значительная связь) выявлен меж-

ду смещением и средним значением температуры воздуха месяцев с положительными значениями. Смещение и годовое количество осадков обнаруживают умеренную корреляционную связь (0,5). Взаимосвязи смещения и высоты снежного покрова не являются статистически значимыми и имеют слабый обратный характер (–0,14 и –0,18).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа параметров смещения точек бровки оползневого уступа получены графики трендов, область размещения реперов условно разделена на южную, центральную и северную части, приведены прогнозные значения смещения на один период по параболическим трендам и коэффициенту ускорения изменения уровня ряда β_2 из уравнения тренда. Также представлено два возможных случая развития оползневого процесса: пассивная стадия и выполаживание склона или начало нового цикла. Для установления достоверного долговременного и кратковременного прогноза оползневого смещения необходимо вести дальнейший детальный геодезический мониторинг. Дополнительно с целью контроля развития деформаций следует установить сеть деформационных знаков на участке дорожного полотна ул. Шахтерская набережная, вовлеченного в оползневый процесс, и далее по мере необходимости — на фундаментах и конструкции прилегающих зданий. Ежегодная обработка информации мониторинга позволит оценивать степень опасности оползня для жилого района, соблности ст. 9 «Требования безопасности при опасных природных процессах и явлениях и (или) техногенных воздействиях»¹ и своевременно предпринять меры. Заключение Геокриологической службы Республики Коми по данным геодезических наблюдений за 2020 г. «... полученные заключения

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 (ред. от 02.07.2013).

говорят о том, что опасности для многоквартирных домов не существует... От оползневых явлений страдает только дорожное полотно набережной»². Это позволяет сделать вывод о временной стабилизации оползневого процесса, но не прекращать геодезический мониторинг. Однако наблюдения были приостановлены.

При оценке динамики движения оползня и ее взаимосвязей с климатическими параметрами за анализируемый период наиболее тесная взаимосвязь выявлена между смещением и средним значением температуры воздуха месяцев с положительными значениями, $K_{\text{кор}}$ составил 0,58. В то же время повышение среднегодовых температур заключается в более теплых месяцах с отрицательной температурой воздуха. В целом в период наблюдений отмечается незначительное повышение среднегодовой температуры воздуха. Удовлетворительная взаимосвязь средней и максимальной высоты снежной толщи с параметрами смещения оползневого тела отсутствует. Данная закономерность не прослеживается, вероятно, ввиду уборки снега с проезжей части ул. Шахтерская набережная. Умеренная связь ($K_{\text{кор}} = 0,5$) присутствует между параметрами смещения и среднегодовым количеством осадков, что объясняет обводнение склона поверхностными водами, как один из определяющих факторов снижения структурных связей грунтов и нарушения состояния равновесия оползневого склона.

Таким образом, такие климатические параметры, как средняя температура воздуха и среднегодовое количество осадков, в целом могут способствовать возникновению неустойчивости оползневого склона в г. Воркута, но коэффициенты корреляции недостаточно высоки, хотя удовлетворительны. Исходя из этого, можно предположить, что тригге-

рами также могут выступать местные природные или техногенные землетрясения. Данные динамические воздействия служат вторичной причиной активизации оползневого процесса, когда склон подходит к состоянию предельного равновесия. В таком случае оползневый процесс является результатом взаимодействия между естественными и техногенными факторами, образующими природно-технологическую систему. В районе исследований техногенная сейсмичность может быть вызвана подземными работами по добыче полезных ископаемых шахтным способом на угольной шахте «Воркутинская»: буровзрывным методом разуплотнения породы и работой проходческих и очистных комбайнов. Следует одновременно вести сейсмический и геодезический мониторинг. Также одним из следующих этапов необходимо провести локальное районирование территории г. Воркуты и прилегающих областей с выделением зон, подверженных опасности проявления оползневых процессов, и характеризующее их распространение и географические и природные условия их проявления. Оптимальным подходом для решения этой задачи предлагается применение статистических и детерминистических методов с использованием ГИС совместно с полевыми исследованиями.

В заключение возможно предложить некоторые инженерные рекомендации для способствования продолжительному пассивному состоянию данного оползневого склона:

- установка теплоизоляционных экранов на глубину сезонного промерзания грунтов;
- обустройство дренажных колодцев в теле оползня и выше по склону в грунтах, в настоящее время не вовлеченных в оползневый процесс.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Heginbottom J.A., Brown J., Ferrians O.J., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Circum-Pacific Map Series CP-45. Washington, DC, 1997. DOI: 10.3133/cp45
2. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 1. С. 79–87. EDN ILKVVN.
3. Оберман Н.Г., Шеслер И.Г., Рубцов А.И. Экогеология Республики Коми и восточной части Ненецкого автономного округа : монография. Сыктывкар : Пролог-Плюс, 2004. 256 с. EDN QJIZQP.

4. Westerveld L., Kurvits T., Schoolmeester T., Eckhoff T.S., Overduin P.P., Fritz M. et al. Arctic Permafrost Atlas. Arendal : GRID-Arendal, 2023. 175 p. DOI: 10.61523/kpji4549
5. Анисимов О.А., Борщ С.В., Георгиевский В.Ю., Инсаров Г.Э., Кобышева Н.В., Костяной А.Г. и др. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М. : Планета, 2012. 512 с. EDN QKKXCN.
6. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего гео-

криологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30). EDN HROYGC.

7. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques : a review // Geoenvironmental Disasters. 2020. Vol. 7. Issue 1. DOI: 10.1186/s40677-020-00152-0

8. Tay L.T., Sh. Alkhasawneh M., Lateh H., Hos-sain M.K., Kamil A.A. Landslide hazard mapping of Penang island using Poisson distribution with dominant factors // Journal of Civil Engineering Research. 2014. Vol. 4. Issue 3A. Pp. 72–77. DOI: 10.5923/c.jce.201402.12

9. Cook M.E., Brook M.S., Hamling I.J. Investigating slow-moving shallow soil landslides using Sentinel-1 InSAR data in Gisborne, New Zealand // Landslides. 2023. Vol. 20. Issue 2. Pp. 427–446. DOI: 10.1007/s10346-022-01982-9

10. Лебедева Е.В., Балдина Е.А., Медведев А.А. Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 3–16. DOI: 10.31857/S0435428122040095. EDN AYXHHN.

11. Чермошенцев А.Ю. Применение данных со спутника Sentinel-1 для оперативного обнаружения оползней // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 4. № 1. С. 29–35. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-4-1-29-35. EDN FWUIZS.

12. Das I., Stein A., Kerle N., Dadhwal V.K. Probabilistic landslide hazard assessment using homogeneous susceptible units (HSU) along a national highway corridor in the northern Himalayas, India // Landslides. 2011. Vol. 8. Issue 3. Pp. 293–308. DOI 10.1007/s10346-011-0257-9

13. Симонян В.В., Николаева Г.А. Исследование оползневых процессов методом корреляционного анализа с использованием случайных функций // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 8 (107). С. 846–853. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.846-853. EDN ZFBXUP.

14. Андреичева Л.Н. Плейстоцен Европейского Северо-Востока : монография. Екатеринбург :

Уральское отделение РАН, 2002. 323 с. EDN YEBCFN.

15. Андреичева Л.Н., Марченко-Ваганова Т.И., Буравская М.Н., Голубева Ю.В. Природная среда неоплейстоцена и голоцена на Европейском Северо-Востоке России. М. : ГЕОС, 2015. 224 с. EDN XXUXPZ.

16. Лютоев В.А., Вихоть А.Н. Влияние оползневых процессов и природно-техногенной микросейсмичности на геологическую среду г. Сыктывкара. Сыктывкар : ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. 79 с.

17. Саламов А.М., Кадиров А.Г., Мухтаров А.Ш., Заманова А.Г., Гасымов Э.Э. Исследование развития оползневых процессов на восточном крыле Бибиэй-батской брахиантиклинали методом электроразведки // ANAS Transactions, Earth Sciences. 2020. № 1. С. 19–27. DOI: 10.33677/ggianas20200100039

18. Christopher W.A.P.P., De Silva N., Attanayake A.M.A.N.B., Jayasingha P. Characterization of landslides: a vertical electrical sounding approach // Geoscience Letters. 2023. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1186/s40562-023-00274-x

19. Damavandi K., Abedi M., Norouzi G.H., Mojarab M. Geoelectrical characterization of a landslide surface for investigating hazard potency, a case study in the Tehran-North freeway, Iran // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2022. Vol. 56. Issue 4. Pp. 339–347. DOI: 10.22059/IJMGE.2022.340800.594958

20. Mebrahtu G., Atsbaha S., Berhe B.A. Vertical Electrical Sounding (VES) investigation for road failure along Mekelle – Abi-Adi road segment, northern Ethiopia // Momona Ethiopian Journal of Science. 2021. Vol. 13. Issue 1. Pp. 134–146. DOI: 10.4314/mejs.v13i1.7

21. Ezung M., Walling T., Chelladurai C. Application of vertical electrical sounding for subsurface characterization to determine slope instability at Perizie, Nagaland // Current World Environment. 2022. Vol. 17. Issue 3. Pp. 657–671. DOI: 10.12944/cwe.17.3.14

22. Flageollet J.C., Maquaire O., Martin B., Weber D. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France) // Geomorphology. 1999. Vol. 30. Issue 1–2. Pp. 65–78. DOI: 10.1016/s0169-555x(99)00045-8

Поступила в редакцию 20 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Анна Николаевна Вихоть — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория региональной геологии; Институт геологии федерального научного центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук имени академика Н.П. Юшкина (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН); 167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; РИНЦ ID: 1150840; vikhot.anna@mail.ru.

REFERENCES

1. Heginbottom J.A., Brown J., Ferrians O.J., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. *Circum-Pacific Map Series CP-45*. Washington, DC, 1997. DOI: 10.3133/cp45
2. Sherstyukov A.B. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. *Earth's Cryosphere*. 2008; 12(1):79-87. EDN ILKVVN. (rus.).
3. Oberman I.G., Shesler I.G., Rubtsova A.I. *Eco-geology of the Komi Republic and the eastern part of Nenets Autonomous Okrug*. Syktyvkar, Prolog-Polyus, 2004; 256. EDN QJIZQP. (rus.).
4. Westerveld L., Kurvits T., Schoolmeester T., Eckhoff T.S., Overduin P.P., Fritz M. et al. *Arctic Permafrost Atlas*. Arendal, GRID-Arendal, 2023; 175. DOI: 10.61523/kpji4549
5. Anisimov O.A., Borshch S.V., Georgievskiy V.Yu., Insarov G.E., Kobysheva N.V., Kostyanov A.G. et al. *Methods of the consequence assessment of the climate change for physical and biological systems*. Moscow, Planeta Publ., 2012; 512. EDN QKKXCN. (rus.).
6. Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V. et al. Permafrost degradation: results of the long-term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*. 2020; 24(2):15-30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30). EDN HROYGC. (rus.).
7. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques : a review. *Geoenvironmental Disasters*. 2020; 7(1). DOI: 10.1186/s40677-020-00152-0
8. Tay L.T., Sh. Alkhasawneh M., Lateh H., Hossain M.K., Kamil A.A. Landslide hazard mapping of Penang island using Poisson distribution with dominant factors. *Journal of Civil Engineering Research*. 2014; 4(3A):72-77. DOI: 10.5923/c.jce.201402.12
9. Cook M.E., Brook M.S., Hamling I.J. Investigating slow-moving shallow soil landslides using Sentinel-1 InSAR data in Gisborne, New Zealand. *Landslides*. 2023; 20(2):427-446. DOI: 10.1007/s10346-022-01982-9
10. Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A. Use of multi-temporal high resolution space images to analyze the slope processes in the Geysernaya river valley (Kamchatka). *Geomorfologiya*. 2022; 53(4):3-16. DOI: 10.31857/S0435428122040095. EDN AYXHHL. (rus.).
11. Chermoshentsev A.Yu. Application of Sentinel-1 data for rapid detection of landslides. *Interexpo GEO-Siberia*. 2020; 4(1):29-35. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-4-1-29-35. EDN FWUIZS. (rus.).
12. Das I., Stein A., Kerle N., Dadhwal V.K. Probabilistic landslide hazard assessment using homogeneous susceptible units (HSU) along a national highway corridor in the northern Himalayas, India. *Landslides*. 2011; 8(3):293-308. DOI 10.1007/s10346-011-0257-9 (rus.).
13. Simonyan V.V., Nikolaeva G.A. Study of the landslide process by the correlation analysis method using random functions. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(8):846-853. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.846-853. EDN ZFBXUP. (rus.).
14. Andreicheva L.N. *The Pleistocene in the European North-East : monograph*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002; 323. EDN YEBCFN. (rus.).
15. Andreicheva L.N., Marchenko-Vagapova T.I., Buravskaya M.N., Golubeva Y.V. *Neopleistocene and holocene natural environment in European North-Eastern of Russia*. Moscow, GEOS, 2015; 224. EDN XXUXPZ. (rus.).
16. Lyutov V.A., Vikhot A.N. *The impact of landslide processes and of natural and technogenic microseismicity on the geological environment of the city of Syktyvkar*. Syktyvkar, Federal Research Center "Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", 2019; 79. (rus.).
17. Salamov A.M., Gadirov A.H., Mukhtarov A.Sh., Zamanova A.H., Gasimov E.E. Development of landslide processes on the eastern wing of the Bibiheybat brachianticline using the electrical survey. *ANAS Transactions, Earth Sciences*. 2020; 1:19-27. DOI: 10.33677/ggianas20200100039 (rus.).
18. Christopher W.A.P.P., De Silva N., Attanayake A.M.A.N.B., Jayasingha P. Characterization of landslides: a vertical electrical sounding approach. *Geoscience Letters*. 2023; 10(1). DOI: 10.1186/s40562-023-00274-x
19. Damavandi K., Abedi M., Norouzi G.H., Mojarab M. Geoelectrical characterization of a landslide surface for investigating hazard potency, a case study in the Tehran-North freeway, Iran. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2022; 56(4):339-347. DOI: 10.22059/IJMGE.2022.340800.594958
20. Mebrahtu G., Atsbaha S., Berhe B.A. Vertical Electrical Sounding (VES) investigation for road failure along Mekelle – Abi-Adi road segment, northern Ethiopia. *Momona Ethiopian Journal of Science*. 2021; 13(1):134-146. DOI: 10.4314/mejs.v13i1.7
21. Ezung M., Walling T., Chelladurai C. Application of vertical electrical sounding for subsurface characterization to determine slope instability at Perizie, Nagaland. *Current World Environment*. 2022; 17(3):657-671. DOI: 10.12944/cwe.17.3.14
22. Flageollet J.C., Maquaire O., Martin B., Weber D. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*. 1999; 30(1-2):65-78. DOI: 10.1016/s0169-555x(99)00045-8

Received November 20, 2023.

Adopted in revised form on December 14, 2023.

Approved for publication on December 14, 2023.

B I O N O T E S: **Anna N. Vikhot** — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, Laboratory of Regional Geology; **Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS)**; 54 Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167000, Russian Federation; ID RSCI: 1150840; vikhot.anna@mail.ru.

Технология жизнеобеспечения пляжных глэмпингов с использованием возобновляемой энергии морских волн

Виктор Владимирович Миронов¹, Юрий Андреевич Иванюшин¹,
Даниил Алексеевич Суглобов^{1,2}, Дмитрий Викторович Миронов³,
Лев Игоревич Максимов¹

¹ Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия;

² Югорский проектный институт; г. Тюмень, Россия;

³ ЭЛЕКТРОРАМ; г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В Российской Федерации прогнозируется рост внутреннего туризма по итогам 2023 г. до 30 % в сравнении с итогами 2022 г. При этом одним из трендов последних лет стал экологический туризм в зонах, как правило, с неразвитой инженерной инфраструктурой.

Материалы и методы. Для решения проблем жизнеобеспечения объектов временного размещения (глэмпингов) предлагается техническое решение по преобразованию гидравлической волновой энергии в прибрежной полосе морских акваторий РФ. Цель исследования — технико-экономическое обоснование применения инновационной технологии жизнеобеспечения на основе возобновляемой волновой энергии для предоставления коммунальных ресурсов, в том числе пресной воды, объектов некапитального размещения (пляжных глэмпингов). Применялись методы численных исследований с использованием статистической информации данных и сведений многолетних наблюдений, поиск отечественных и зарубежных источников с анализом и сопоставлением содержащихся данных.

Результаты. Представлены расчеты производительности по пресной воде с учетом неравномерности волновых характеристик (высот, периодов) в течение года на примере акваторий Черного и Японского морей. Установлено, что даже с учетом неравномерности волновых характеристик прибрежная полоса Черного моря является коммерчески значимой территорией для внедрения. Прибрежная полоса Японского моря — перспективная территория в случае сезонной эксплуатации объектов с предлагаемой технологией. Определен срок окупаемости технологии при эксплуатации на черноморском побережье.

Выводы. Предлагаемый насос-компрессор способен заменить энергопотребляющее оборудование обратноосмотических установок — насосы высокого давления для подачи морской воды на мембраны. Использование технологии на замерзающих морях целесообразно при некруглогодичном режиме работы. Срок окупаемости в зависимости от стоимости электроэнергии не превышает двух лет без учета сопутствующей снимаемой полезной пневматической мощности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: насос-компрессор, обратный осмос, морская вода, плавучие модули, сиффон, волновые характеристики, производительность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Суглобов Д.А., Миронов Д.В., Максимов Л.И. Технология жизнеобеспечения пляжных глэмпингов с использованием возобновляемой энергии морских волн // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 618–630. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630

Автор, ответственный за переписку: Юрий Андреевич Иванюшин, ivanjushin@tyuiu.ru.

Life support technology of beach glamping using renewable energy of sea waves

Viktor V. Mironov¹, Yuriy A. Ivanyushin¹, Daniil A. Suglobov^{1,2},
Dmitriy V. Mironov³, Lev I. Maksimov¹

¹ Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation;

² Yugra Design Institute; Tyumen, Russian Federation;

³ ELECTRORAM; Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The growth of domestic tourism in the Russian Federation is forecasted to reach 30 % by the end of 2023 compared to the results of 2022. At the same time, ecological tourism in areas with undeveloped engineering infrastructure has become one of the trends of recent years.

Materials and methods. To solve the problems of life support of temporary accommodation facilities (glamping), a technical solution for the conversion of hydraulic wave energy in the coastal zone of Russian sea areas is proposed. The purpose

of the research is a feasibility study of the application of innovative life support technology based on renewable wave energy to provide municipal resources, including fresh water, to non-permanent accommodation facilities (beach glamping). To achieve this goal, numerical research methods were used using statistical data and long-term observational data, searching for domestic and foreign sources with analysis and comparison of the contained data.

Results. Calculations of fresh water productivity are presented, taking into account the unevenness of wave characteristics (heights, periods) throughout the year using the example of the Black sea and the Sea of Japan. It is established that even taking into account the uneven wave characteristics, the Black Sea coastal zone is a commercially significant territory for implementation. The coastal zone of the Sea of Japan is a promising territory in the case of seasonal operation of facilities with the proposed technology. The payback period of the technology for operation on the Black Sea coast was determined.

Conclusions. The proposed pump-compressor is able to replace energy-consuming equipment of reverse osmosis installations — high-pressure pumps for supplying seawater to the membranes. The use of technology on the freezing seas is expedient in the non-year-round operation mode. The payback period, depending on the cost of electricity, does not exceed two years without taking into account the associated removal of useful pneumatic power.

KEYWORDS: pump-compressor, reverse osmosis, sea water, floating modules, bellows, wave characteristics, productivity

FOR CITATION: Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Suglovov D.A., Mironov D.V., Maksimov L.I. Life support technology of beach glamping using renewable energy of sea waves. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):618-630. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630 (rus.).

Corresponding author: Yuriy A. Ivanyushin, ivanjushinja@tyuiu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с ограничениями регулярного авиа-сообщения со многими странами, предоставляющими услуги оздоровительного отдыха и туризма, сложностями в их оплате появился повышенный спрос на соответствующие услуги на внутреннем рынке [1]. С целью развития внутреннего туризма и расширения его инфраструктуры Правительством РФ¹, начиная с 2022 г., принято решение о поддержке и софинансировании строительства новых пляжных модульных гостиниц (глэмпингов) практически на всех морях, окружающих территорию России.

Многие путешественники выбирают для отдыха места, отдаленные от цивилизации, среди природы. Походы с рюкзаками и палатками идеально подходят для таких целей. Однако современные люди, особенно городское население, привыкли к комфорту и привычным удобствам (доступ к электросетям, питьевой воде, канализации) [2, 3]. Далеко не все возводимые пляжные модульные отели, в том числе глэмпинги, из-за удаленности от населенных территорий будут подключены к централизованным системам жизнеобеспечения. Использование автономных дизельных генераторов энергии для жизнеобеспечения отелей экономически нецелесообразно ввиду высокой стоимости получаемой энергии [4, 5]. В работе [6] отмечено, что российский рынок глэмпинг-туризма развивается в направлении повышения экологичности.

В статье предлагается использовать возобновляемую энергию морских волн высокой обеспеченности и повторяемости для автономного жизнеобеспечения отелей (водоснабжение, тепло и электроснабжение, получение холода).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — технико-экономическое обоснование применения инновационной техноло-

гии жизнеобеспечения на основе возобновляемой волновой энергии для предоставления коммунальных ресурсов, в том числе пресной воды, объектов некапитального размещения (пляжных глэмпингов).

Волновая энергетика — практически неисчерпаемый источник энергии. Учитывая, что 2 % от 800 тыс. км протяженности мировой береговой линии имеет плотность мощности волн более 30 кВт/м, предполагаемый глобальный технический потенциал волнового течения составляет около 500 ГВт электроэнергии (с эффективностью преобразования 40 %). Технико-экономически эффективные места размещения объектов преобразования волновой энергии можно найти по всему миру. В то же время фактические волновые режимы значительно различаются в разных регионах мира [7].

Техническое решение

Разработанное коллективом авторов (Тюменский индустриальный университет, ООО «ЭЛЕКТРОРАМ») техническое решение позволяет снимать энергию морских волн высотой до двух метров и преобразовывать ее в гидравлическую мощность высокого давления, необходимую для работы стандартных обратноосмотических опреснительных установок, а также преобразовывать энергию морских волн в пневматическую мощность. Из полученной пневматической мощности с использованием известных технологий можно генерировать тепло, холод или электрическую энергию для жизнеобеспечения пляжных модульных гостиниц. Техническое решение представляет собой сильфонный насос-компрессор, приводимый в работу бум с положительной плавучестью, способным подстраиваться под изменяющийся уровень морской акватории под действием приливно-отливных или нагонных ветровых явлений. Схема насоса-компрессора представлена на рис. 1.

В случае нахождения буя с положительной плавучестью на гребне волны (рис. 1, а) сильфоны растянуты за счет выталкивающей силы воды, дей-

¹ Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие туризма»: Постановление Правительства РФ от 24.12.2021 № 2439.

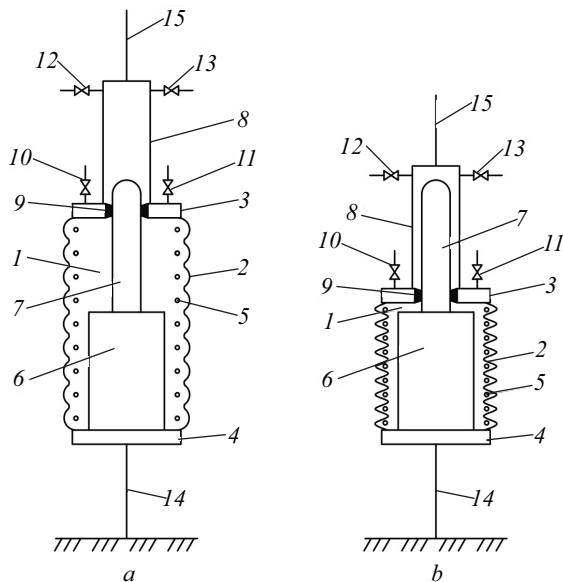


Рис. 1. Схема сифонного генератора (насоса-компрессора) гидравлической и пневматической энергии при различном положении буя: *a* — буй на гребне морской волны; *b* — буй во впадине волны; 1 — рабочая камера; 2 — сифонные элементы из эластичного материала; 3 — верхняя стенка рабочей камеры; 4 — днище рабочей камеры; 5 — кольца жесткости; 6 — цилиндр, являющийся поршнем воздушного компрессора; 7 — плунжер водяного насоса; 8 — корпус водяного насоса; 9 — уплотнение плунжера водяного насоса; 10 — всасывающий клапан воздушного компрессора; 11 — нагнетательный клапан воздушного компрессора; 12 — всасывающий клапан водяного насоса; 13 — нагнетательный клапан водяного насоса; 14 — трос, соединяющий днище рабочей камеры с дном акватории моря; 15 — трос, соединяющий корпус водяного насоса с плавучим буюм, снимающим энергию морских волн

Fig. 1. Scheme of a bellows generator (pump-compressor) of hydraulic and pneumatic energy at different positions of the buoy: *a* — buoy on the crest of a sea wave; *b* — buoy in the hollow of the wave; 1 — working chamber; 2 — bellows elements made of elastic material; 3 — upper wall of the working chamber; 4 — bottom of the working chamber; 5 — stiffening rings; 6 — cylinder, which is the piston of an air compressor; 7 — water pump plunger; 8 — body of the water pump; 9 — seal of the plunger of the water pump; 10 — air compressor suction valve; 11 — air compressor discharge valve; 12 — water pump suction valve; 13 — water pump discharge valve; 14 — cable connecting the bottom of the working chamber with the bottom of the sea; 15 — cable connecting the body of the water pump with a floating buoy that removes the energy of sea waves

ствующей на плавучий буй (такт всасывания воздуха и воды). Сжатие сифонов (рис. 1, *b*) осуществляется за счет гидростатического давления воды в месте установки рабочей камеры (такт нагнетания воды и воздуха).

Сифонный насос-компрессор содержит рабочую камеру, образованную соединенными между

собой сифонными элементами из эластичного материала. Рабочая камера закрыта с одной стороны подвижной стенкой, с другой — неподвижным днищем. Сифонные элементы из эластичного материала снабжены кольцами жесткости для предотвращения деформации сифонных элементов под действием гидростатического давления воды на глубине установки рабочей камеры. К днищу внутри рабочей камеры прикреплен цилиндр, предотвращающий образование мертвого объема в рабочей камере при сжатии и нагнетании воздуха. Также к цилиндру прикреплен плунжер водяного насоса, входящий в корпус водяного насоса. Плунжер прикреплен к подвижной стенке рабочей камеры. В верхней стенке рабочей камеры выполнено уплотнение плунжера водяного насоса. Всасывающий и нагнетательный клапаны воздушного компрессора размещены на верхней стенке рабочей камеры. Всасывающий и нагнетательный клапаны водяного насоса размещены на корпусе водяного насоса. Днище рабочей камеры закреплено с дном акватории моря тросом. Корпус водяного насоса соединен с плавучим буюм, снимающим энергию морских волн, тросом. На рис. 2 представлена схема съемника энергии морских волн, совмещенного с генераторами гидравлической и пневматической энергии.

Разработанные технические решения позволяют использовать возобновляемую энергию морских волн для одновременной генерации гидравлической и пневматической энергии, что дает возможность исключить загрязнение окружающей среды парниковыми газами. Внедрение схем тригенерации энергии [8–10] из различных возобновляемых источников является распространенным способом повышения эффективности разрабатываемых технологий. Схема преобразования полученной гидравлической и пневматической энергии в полезные коммунальные ресурсы для систем жизнеобеспечения зданий и сооружений представлена на рис. 3.

Энергетическая станция для автономного жизнеобеспечения пляжных модульных гостиниц представляет собой модульную конструкцию. Количество модулей выбирается в зависимости от потребностей в энергии и пресной воде конкретного пляжного отеля.

Расчетные зависимости

Рассмотрим работу энергетической станции, состоящей из плавучих модулей, работающей на энергии морских волн высокой обеспеченности. Сифонный генератор (насос-компрессор) погружен на глубину H_p ниже поверхности морской акватории. Тогда избыточное давление p , Па, на глубине H_p во впадине волны составит:

$$p = \rho \cdot g \cdot (H_p - a), \quad (1)$$

где ρ — плотность морской воды, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; a — амплитуда морской волны, м, равная половине ее высоты H .

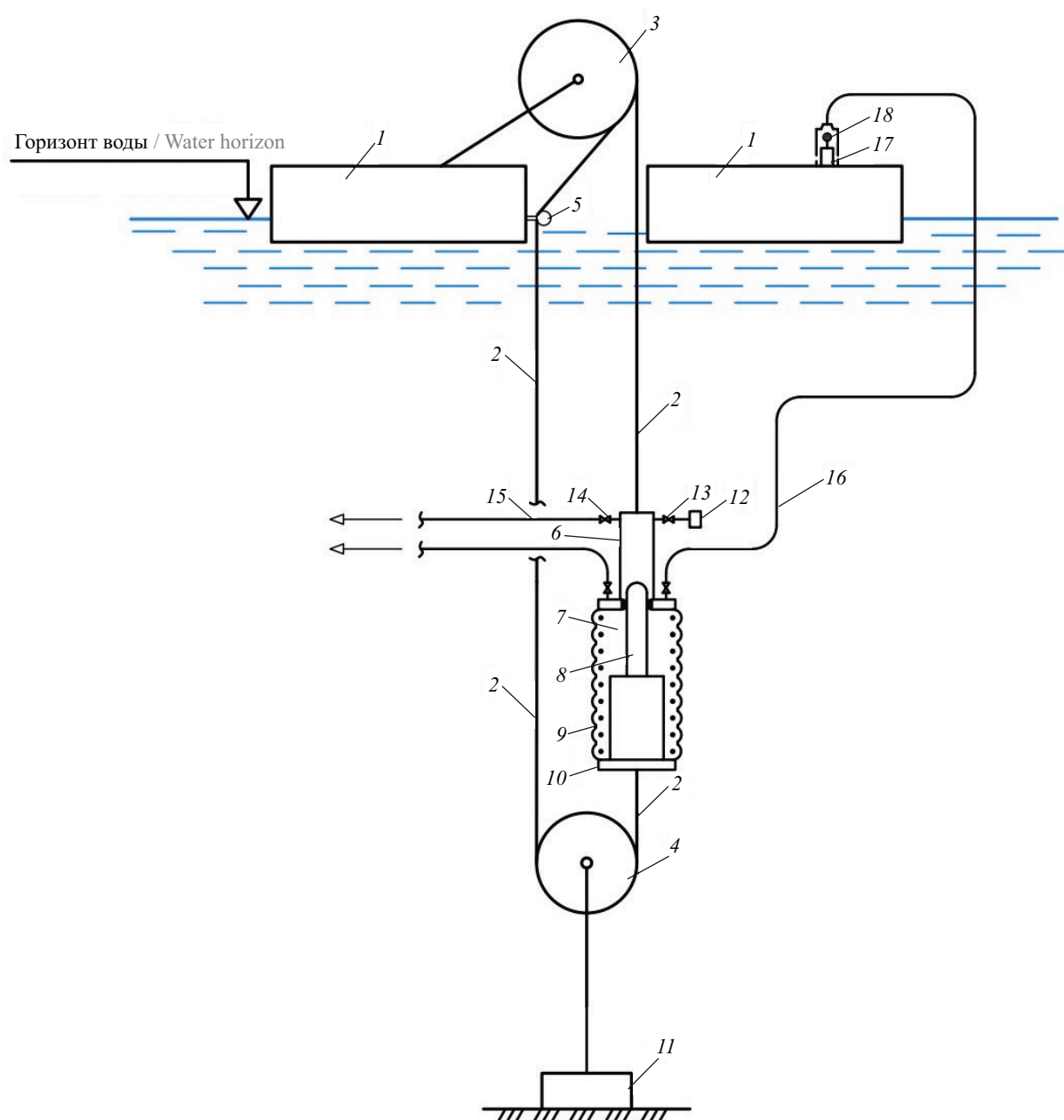


Рис. 2. Полиспастная схема сьемника энергии морских волн с генераторами гидравлической и пневматической энергии: 1 — привод генератора — буй с положительной плавучестью; 2 — тросы; 3 — барабан, снабженный храповым механизмом и спиральной ленточной пружиной; 4 — блок; 5 — направляющий ролик; 6 — корпус генератора пневматической и гидравлической энергии; 7 — воздушная камера; 8 — рабочий подвижный орган генератора пневматической и гидравлической энергии; 9 — сильфонные элементы из эластичного материала; 10 — днище рабочей камеры; 11 — пригруз на дне акватории; 12 — фильтр для очистки забираемой воды; 13 — всасывающий обратный клапан насоса; 14 — нагнетательный обратный клапан насоса; 15 — линия подачи воды в обратноосмотический модуль; 16 — трубопровод, сообщающийся с воздушной атмосферой; 17 — поплавков автоматического клапана; 18 — запорный орган автоматического клапана

Fig. 2. Scheme of a sea wave energy puller with a hydraulic and pneumatic energy generator: 1 — generator drive — buoy with positive buoyancy; 2 — cables; 3 — drum equipped with a ratchet mechanism and a spiral band spring; 4 — block; 5 — guide roller; 6 — body of pneumatic and hydraulic power generator; 7 — air chamber; 8 — working movable body of the generator of pneumatic and hydraulic energy; 9 — bellows elements made of elastic material; 10 — bottom of the working chamber; 11 — cargo at the bottom of the water area; 12 — intake water filter; 13 — pump suction check valve; 14 — pump discharge check valve; 15 — water supply line to the reverse osmosis module; 16 — pipe that communicates with the air atmosphere; 17 — automatic valve float; 18 — shut-off element of the automatic valve

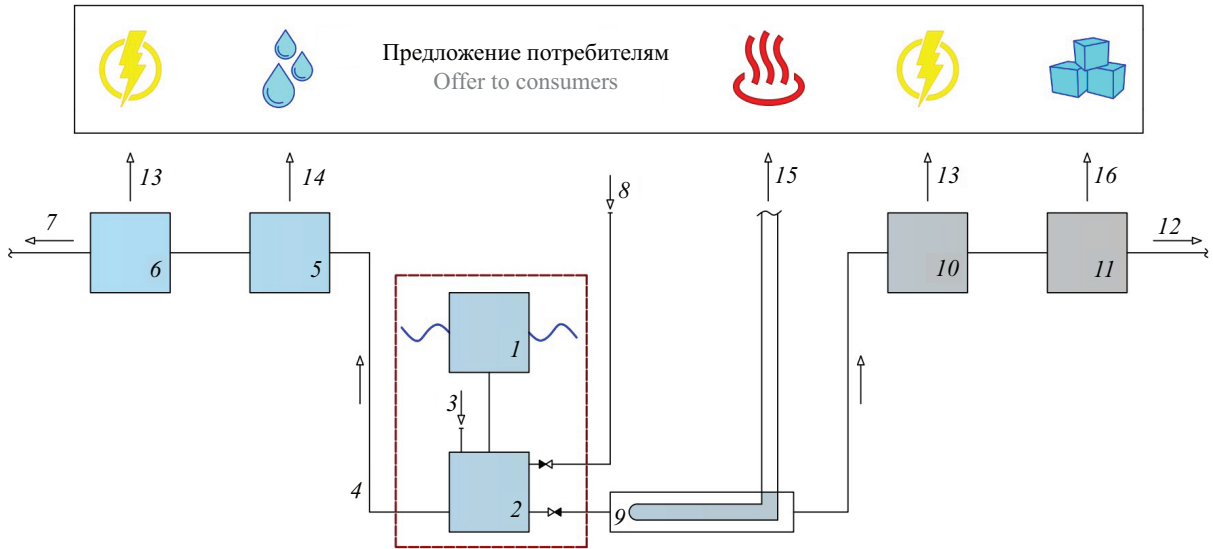


Рис. 3. Схема преобразования полученной пневматической энергии в тепловую, энергию холода и электрическую: 1 — привод генератора — буй с положительной плавучестью; 2 — генератор пневматической и гидравлической энергии; 3 — забор морской воды; 4 — напорная линия; 5 — обратноосмотическая установка; 6 — гидромотор с генератором электрической энергии; 7 — рассредоточенный сброс рассола; 8 — забор атмосферного воздуха; 9 — ресивер — теплообменный аппарат; 10 — детандер; 11 — холодильная камера (генератор льда); 12 — сброс охлажденного воздуха; 13 — электроэнергия; 14 — пресная вода; 15 — тепловая энергия; 16 — холод (лед)

Fig. 3. Scheme of conversion of the received pneumatic energy into thermal, cold and electric energy: 1 — generator drive — buoy with positive buoyancy; 2 — pneumatic and hydraulic power generator; 3 — sea water intake; 4 — pressure line; 5 — reverse osmosis plant; 6 — hydraulic motor with electric power generator; 7 — dispersed brine discharge; 8 — atmospheric air intake; 9 — receiver — heat exchanger; 10 — expander; 11 — cooling chamber (ice generator); 12 — cool air discharge; 13 — electricity; 14 — fresh water; 15 — thermal energy; 16 — cold (ice)

Перепад избыточного давления, обеспечивающего заданное давление в воздушной камере:

$$\Delta p = p - p_D, \tag{2}$$

где p_D — заданное избыточное давление в воздушной камере, Па.

Сила гидростатического давления F на впадине волны на верхнюю стенку воздушной камеры генератора энергии с учетом противодействия в воздушной камере:

$$F = \Delta p \cdot \omega = \Delta p \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \tag{3}$$

где ω — площадь сечения круглой верхней стенки рабочей камеры, м^2 , диаметром D , м.

Погружение буйа под уровень моря, компенсирующее его вес h_1 , м:

$$h_1 = \frac{G}{\rho \cdot g \cdot \omega_1}, \tag{4}$$

где G — вес буйа, Н; ω_1 — площадь поверхности буйа, м^2 .

Выталкивающая сила, действующая на буй, при его погружении под уровень акватории F_2 :

$$F = \rho \cdot g \cdot \omega_1 \cdot h_b, \tag{5}$$

где h_b — заданное рабочее погружение буйа, м.

При работе полиспаста выталкивающая сила, действующая на буй, должна быть в два раза боль-

ше силы гидростатического давления на верхнюю стенку воздушной камеры генератора пневматической энергии.

Полная высота буйа h_p , м:

$$h_p = h_1 + h_b + h_3, \tag{6}$$

где h_3 — высота запаса, не менее 0,05 м.

Максимальная выталкивающая сила F_3 , Н, на величину которой должно рассчитываться крепление к донной поверхности акватории (анкер или пригруз):

$$F = \rho \cdot g \cdot \omega_1 \cdot h_p. \tag{7}$$

Давление p_1 , развиваемое плунжером, в камере насоса с учетом давления воздуха в камере компрессора, Па:

$$p_1 = \frac{F}{\omega_2}, \tag{8}$$

где ω_2 — площадь сечения плунжера, м^2 , диаметром d .

Ход плунжера с полиспастом h_n , зависящий от высоты волны, м:

$$h_n = 2(H - h_b). \tag{9}$$

Производительность сильфонного генератора по воде:

- в час морской воды, $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$q_{hr}^{sea} = \omega_2 \cdot h_{п} \cdot \frac{3600}{T}, \quad (10)$$

где T — период морской волны, с;
• в час пресной воды, м³/ч:

$$q_{hr}^{fr} = k \cdot q_{hr}^{sea}, \quad (11)$$

где k — доля образующейся пресной воды из морской при подаче воды на обратноосмотическую установку [11–13];
• среднесуточная производительность по пресной воде, м³/сут:

$$Q_t^{fr} = t \cdot k \cdot q_{hr}^{sea}, \quad (12)$$

где t — продолжительность работы сильфонного генератора и обратноосмотической установки в течение суток, ч;
• среднегодовая производительность по пресной воде, м³/год:

$$Q_{год}^{fr} = n_{г} \cdot Q_t^{fr}, \quad (13)$$

где $n_{г} = 365$ сут — продолжительность календарного года.

Исходные данные

Основными исходными данными для расчета характеристик энергетической станции, в том числе производительности технологии по пресной воде, яв-

ляются высота морской волны H , м, и ее период T , с, в месте размещения (в прибрежной полосе морской акватории). Данные многолетних наблюдений величин H и T в акватории Черного и Японского морей представлены на рис. 4, выполненном по данным работ [14, 15]. Аналогичные сведения содержатся и по другим морским территориям РФ.

В Черном и Японском морях преобладают волны высотой до двух метров, суммарная годовая повторяемость которых составляет 84,8 и 82,6 % соответственно. Наиболее часто в акваториях встречаются волны с периодом от 2 до 6 с. При этом, если в Черном море волны с периодом 2–4 и 4–6 с встречаются в практически равных долях (46,2 и 48,2 % от общего числа волн), то в акватории Японского моря преобладают волны малого периода, до 4 с — 64,3 % от общего числа волн.

Кроме того, в акватории Черного моря присутствуют значительные сезонные изменения средних высот волн, достигающих максимальных значений в зимний период года (двукратное увеличение) [16–19], что подтверждает данные по высотам средних волн в прибрежной полосе (рис. 5).

Определенным интересом для практического применения технологии является прибрежная зона Японского моря, сезонный волновой режим которо-

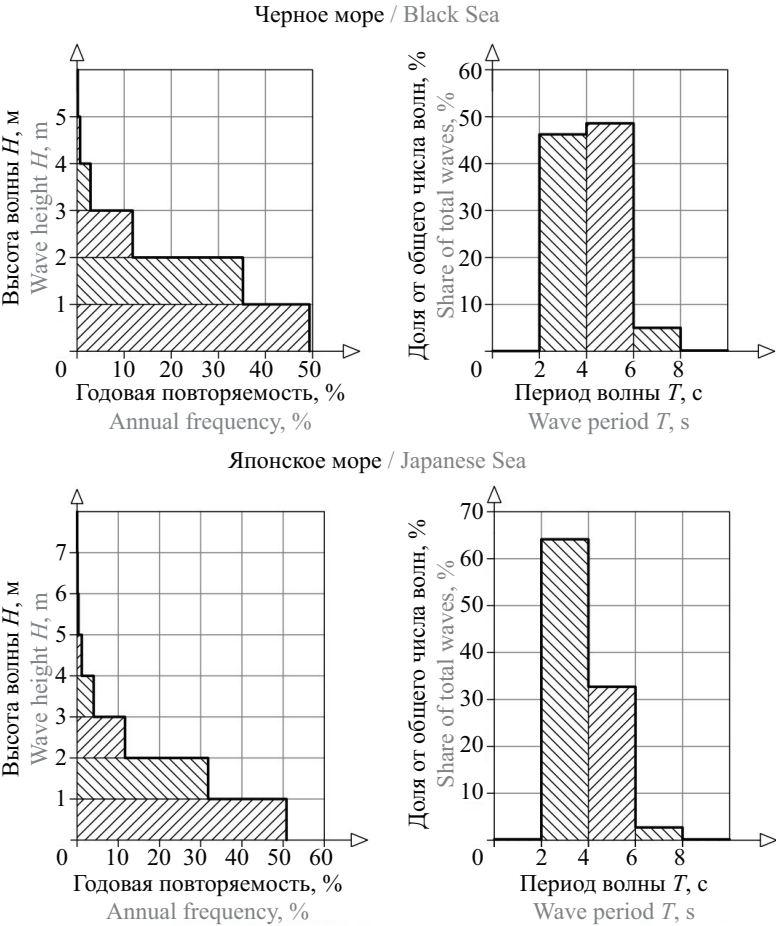


Рис. 4. Данные многолетних наблюдений высоты и периода волн в акватории Черного и Японского морей
Fig. 4. Data of long-term observations of height and period of waves in the waters of the Black Sea and the Sea of Japan

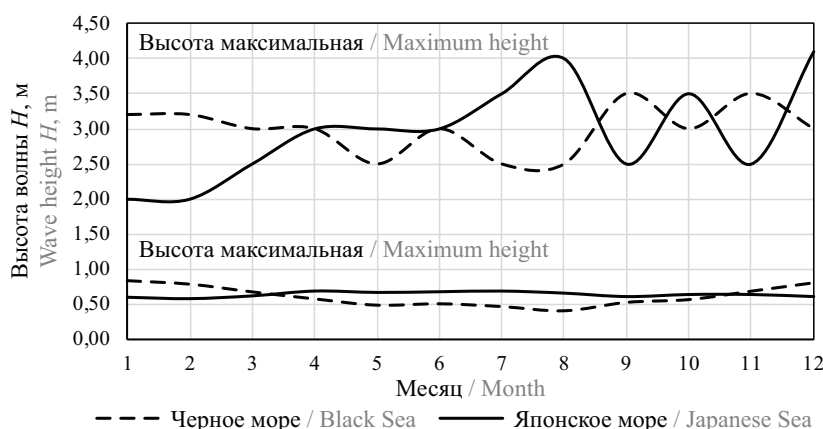


Рис. 5. Средние и максимальные высоты волн в прибрежных полосах Черного (от Анапы до Пицунды) и Японского (от Посыета до Находки) морей (среднемесячные многолетние данные²)

Fig. 5. Average and maximum wave heights in the coastal zones of the Black Sea (from Anapa to Pitsunda) and the Sea of Japan (from Posyet to Nakhodka) (average monthly long-term data²)

го равномернее (стабильнее) [20], исходя из средней высоты волны (рис. 5).

Тем не менее величина ветрового волнения непостоянна и изменяется в достаточно большом диапазоне в течение месяца и отдельных суток (рис. 6).

Следует учитывать, что зимой море частично замерзает. Ледяной покров достигает максимального развития в середине февраля. В среднем льдом покрывается 52 % площади Татарского пролива и 56 % — залива Петра Великого [21] с продолжительностью до 4–5 месяцев ежегодно. В связи с этим при определении годовой производительности технологии в формулу (14) необходимо вводить поправочный коэффициент, учитывающий прогнозируемую продолжительность наличия ледяного покрова в проектируемом районе.

С учетом вышеизложенного формула (14) для определения годовой производительности по пресной воде принимает вид:

$$Q_{\text{год}}^{\text{пр}} = t \cdot k \cdot k_1 \cdot \omega_2 \cdot \sum_{i=1}^{i=12} h_{ni} \cdot n_i \cdot \frac{3600}{T_i}, \quad (14)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий продолжительность наличия ледяного покрова в месте размещения; h_{ni} — ход плунжера, зависящий от средней высоты волны H_i в течение i -го месяца, м; n_i — продолжительность i -го месяца, сут; T_i — средний период волны i -го месяца, с.

Учитывая процентное соотношение периодов волн (согласно данным [7, 8], рис. 4) и считая, что это соотношение в течение года не изменяется, формула (14) примет вид:

$$Q_{\text{год}}^{\text{пр}} = t \cdot k \cdot k_1 \cdot \omega_2 \cdot \sum_{i=1}^{i=12} h_{ni} \cdot n_i \cdot \frac{3600}{\sum \left(\frac{m_j}{T_j^{\text{mid}}} \right)}, \quad (15)$$

где m_j — удельный вес волн, обладающих периодом j -го диапазона от их общего числа, в долях единицы; T_j^{mid} — средний период волны в выделенном j -м диапазоне.

Для расчета гипотетического примера принята прибрежная полоса акватории Японского и Черного морей. Характеристики модульной энергетической станции: диаметр верхней стенки воздушной камеры $D = 0,3$ м, диаметр плунжера (поршня) $d = 0,05$ м, конструкция буя квадратная, со стороной равной $b = 3,6$ м. Вес буя $G = 1250$ Н. Число модулей энергетической станции $N = 30$ ед. Месячная средняя высота волн принята согласно рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчета производительности энергетической станции по пресной воде представлены в табл. 1, 2.

Недостатком реализации технологии в прибрежной полосе акватории Японского моря является наличие ледяного покрова в течение трех зимних месяцев. В этом случае необходимо предусматривать буферные емкости (резервуары чистой воды) для запаса воды. Суммарный объем данных резервуаров для гипотетического примера должен быть не менее 18 тыс. м³ (запас на 90 дней для 1030 потребителей, объем определен на основе графика поступления-потребления). При реализации и внедрении технологии в прибрежной полосе акватории Черного моря суммарный объем буферной емкости (резервуаров чистой воды) не будет превышать 300 м³.

Сравнение результатов определения месячных производительностей (табл. 1, 2) представлено на рис. 7.

Экономическая составляющая

Подводящая гидравлическая мощность на насос N_1 , Вт, одного модуля без учета сопутствующей

² Климат морей России // Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане. URL: <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/services/climate>

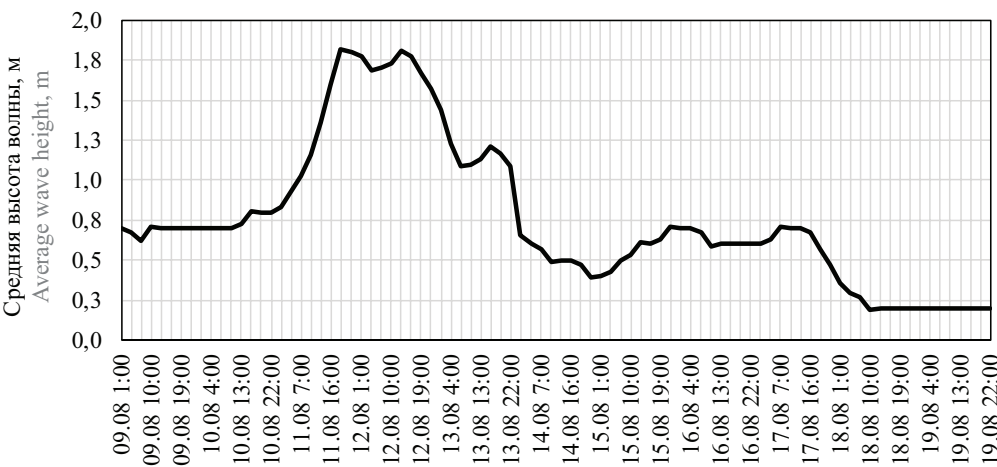


Рис. 6. Средняя высота волны в Японском море в районе бухты Рында (о. Русский) в период с 09.08.2023 по 19.08.2023

Fig. 6. Average wave height in the Sea of Japan near Rynda Bay (Russian Island) in the period from 08.09.2023 to 08.19.2023

Табл. 1. Производительность технологии в случае внедрения в западной части прибрежной полосы Японского моря

Table 1. Technology performance in the case of implementation in the western part of the coastal zone of the Sea of Japan

Периоды волн T , с Wave periods T , s		0–2	2–4	4–6	6–8	≥ 8	Среднечасовая (в течение месяца) производительность по пресной воде, м ³ /ч Average hourly (over the course of a month) fresh water productivity, m ³ /h	Месячный объем производимой пресной воды одним модулем, м ³ Monthly volume of fresh water produced by one module, m ³
Принятый период волны в выделенном диапазоне T^{mid} , с Accepted wave period in the selected range T^{mid} , s		1	3	5	7	10		
Месяц Month	Удельный вес m выделенного диапазона периодов Specific weight m of the selected range of periods	0,002	0,6413	0,3270	0,0272	0,0018		
	Средняя высота волны H , м Average wave height H , m	Среднечасовая производительность по пресной воде, л/ч, в выделенном диапазоне периодов волн от одного модуля Average hourly productivity for fresh water, l/h, in the selected range of wave periods from one module						
1	0,59	2,50	267,32	81,78	4,86	0,23	0,357	265,37
2	0,57	2,42	258,25	79,01	4,69	0,22	0,345	231,57
3	0,61	2,59	276,38	84,56	5,02	0,23	0,369	274,37
4	0,68	2,88	308,09	94,26	5,60	0,26	0,411	295,99
5	0,66	2,80	299,03	91,49	5,44	0,25	0,399	296,86
6	0,67	2,84	303,56	92,87	5,52	0,26	0,405	291,63
7	0,68	2,88	308,09	94,26	5,60	0,26	0,411	305,85
8	0,65	2,76	294,50	90,10	5,35	0,25	0,393	292,36
9	0,60	2,54	271,85	83,17	4,94	0,23	0,363	261,17
10	0,63	2,67	285,44	87,33	5,19	0,24	0,381	283,36
11	0,63	2,67	285,44	87,33	5,19	0,24	0,381	274,22
12	0,60	2,54	271,85	83,17	4,94	0,23	0,363	269,87
Всего за год от одного модуля, м ³ / In just a year from one module, m ³								3342,63
Всего за год от $N = 30$ модулей, тыс. м ³ / In total for a year from $N = 30$ modules, thousand m ³								100,279
В том числе с учетом наличия ледяного покрова в течение 3 зимних месяцев ($k_1 = 0,75$), тыс. м ³ Including taking into account the presence of ice cover during 3 winter months ($k_1 = 0.75$), thousand m ³								75,209
Среднесуточная (за год) производительность от $N = 30$ модулей, м ³ /сут Average daily (per year) productivity from $N = 30$ modules, m ³ /day								206,053
Эквивалентное число потребителей (при принятом удельном водопотреблении 200 л/сут на чел.), чел. Equivalent number of consumers (at the accepted specific water consumption 200 l/day per person), person								1030

Табл. 2. Производительность технологии в случае внедрения в прибрежной полосе Черного моря
Table 2. Technology performance in the case of implementation in the coastal zone of the Black Sea

Периоды волн T , с Wave periods T , s		0–2	2–4	4–6	6–8	≥ 8	Средне- часовая (в течение месяца) производи- тельность по пресной воде, м³/ч Average hourly (over the course of a month) fresh water productivity, m³/h	Месяч- ный объем произ- водимой пресной воды од- ним мо- дулем, м³ Monthly volume of fresh water produced by one module, m³
Принятый период волны в выделенном диапазоне T^{mid} , с Accepted wave period in the selected range T^{mid} , s		1	3	5	7	10		
Месяц Month	Удельный вес m выделенного диа- пазона периодов Specific weight m of the selected range of periods	0,0006	0,4623	0,4859	0,0050	0,0016		
	Средняя высота волны H , м Average wave height H , m	Среднечасовая производительность по пресной воде, л/ч, в выделенном диапазоне периодов волн от одного модуля Average hourly productivity for fresh water, l/h, in the se- lected range of wave periods from one module						
1	0,83	1,06	271,09	170,96	12,57	0,28	0,456	339,23
2	0,78	0,99	254,76	160,66	11,81	0,26	0,428	287,94
3	0,67	0,85	218,83	138,00	10,14	0,23	0,368	273,83
4	0,57	0,72	186,17	117,40	8,63	0,19	0,313	225,45
5	0,48	0,61	156,78	98,87	7,27	0,16	0,264	196,18
6	0,5	0,64	163,31	102,99	7,57	0,17	0,275	197,76
7	0,46	0,58	150,24	94,75	6,96	0,16	0,253	188,01
8	0,4	0,51	130,65	82,39	6,06	0,14	0,220	163,48
9	0,52	0,66	169,84	107,11	7,87	0,18	0,286	205,67
10	0,56	0,71	182,90	115,34	8,48	0,19	0,308	228,88
11	0,68	0,86	222,10	140,06	10,29	0,23	0,374	268,96
12	0,8	1,02	261,29	164,78	12,11	0,27	0,439	326,97
Всего за год от одного модуля, м³ / In just a year from one module, m³								2902,35
Всего за год от $N = 30$ модулей, тыс. м³ / In total for a year from $N = 30$ modules, thousand m³								87,071
Ледяной покров на поверхности акватории отсутствует, тыс. м³ There is no ice cover on the surface of the water area, thousand m³								–
Среднесуточная (за год) производительность от $N = 30$ модулей, м³/сут Average daily (per year) productivity from $N = 30$ modules, m³/day								238,549
Эквивалентное число потребителей (при принятом удельном водопотреблении 200 л/сут на чел.), чел. Equivalent number of consumers (at the accepted specific water consumption 200 l/day per person), person								1190

снимаемой пневматической мощности:

$$N_1 = F \cdot \frac{H - h_b}{T}. \tag{16}$$

Срок окупаемости внедренного технического решения в случае использования разработанных технических решений только с целью получения пресной воды определяется как:

$$T_{ок} = \frac{C_1}{\mathfrak{E}_{год}}, \tag{17}$$

где C_1 — стоимость одного модуля не превышает $C_1 \leq 300$ тыс. руб.; $\mathfrak{E}_{год}$ — годовая экономия на электроэнергии за счет внедрения энергетической модульной станции, тыс. руб.:

$$\mathfrak{E}_{год} = c_{кВт\cdot ч} \cdot F \cdot \sum_{i=1}^{i=12} \frac{H_i - h_b}{\sum \left(\frac{m_j}{T_j^{mid}} \right)} \cdot t \cdot k_1 \cdot n_i, \tag{18}$$

где $c_{кВт\cdot ч}$ — стоимость электроэнергии в месте размещения технологии, руб./кВт·ч; H_i — средняя высота волны в i -й месяц, м.

Графическое отображение формулы (17) приведено на рис. 8. Горизонтальная линия — числитель формулы, наклонные линии — знаменатель. Пересечение линий — точка окупаемости. Срок окупаемости только при производстве пресной воды (в сравнении с применением стандартных центробежных насосов для подачи на обратноосмотические мембраны) составляет от 11 месяцев до 2 лет

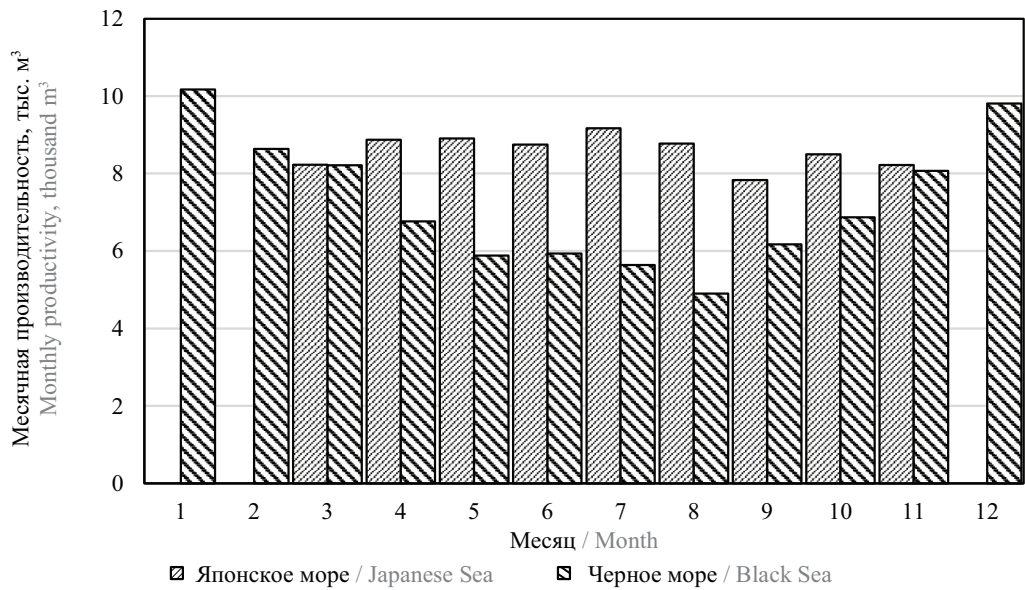


Рис. 7. Месечная производительность технологии при внедрении и реализации в прибрежной полосе Японского и Черного морей

Fig. 7. Monthly productivity of the technology during introduction and implementation in the coastal zone of the Black Sea and the Sea of Japan

в зависимости от стоимости электроэнергии — от 5 до 10 руб. за 1 кВт·ч. При реализации всей технологической схемы (рис. 3) срок окупаемости будет снижаться до двух раз в зависимости от местных условий.

Чем меньше стоимость плавучих модулей и выше цена на электроэнергию с учетом логистики (например, при генерации на автономном источнике — дизель-генераторе), тем эффективнее использование возобновляемой энергии морских волн для жизнеобеспечения пляжных модульных отелей. Кроме того, применение возобновляемой энергии

не загрязняет воздух в месте расположения пляжных глэмпингов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанное техническое решение насоса-компрессора позволяет исключить из обратноосмотических установок энергопотребляющее оборудование — высоконапорные насосы подачи морской воды на обратноосмотические мембраны (рис. 3). Предлагаемая технология жизнеобеспечения пляжных глэмпингов в прибрежной полосе морских акваторий дает возможность получать объемы пре-

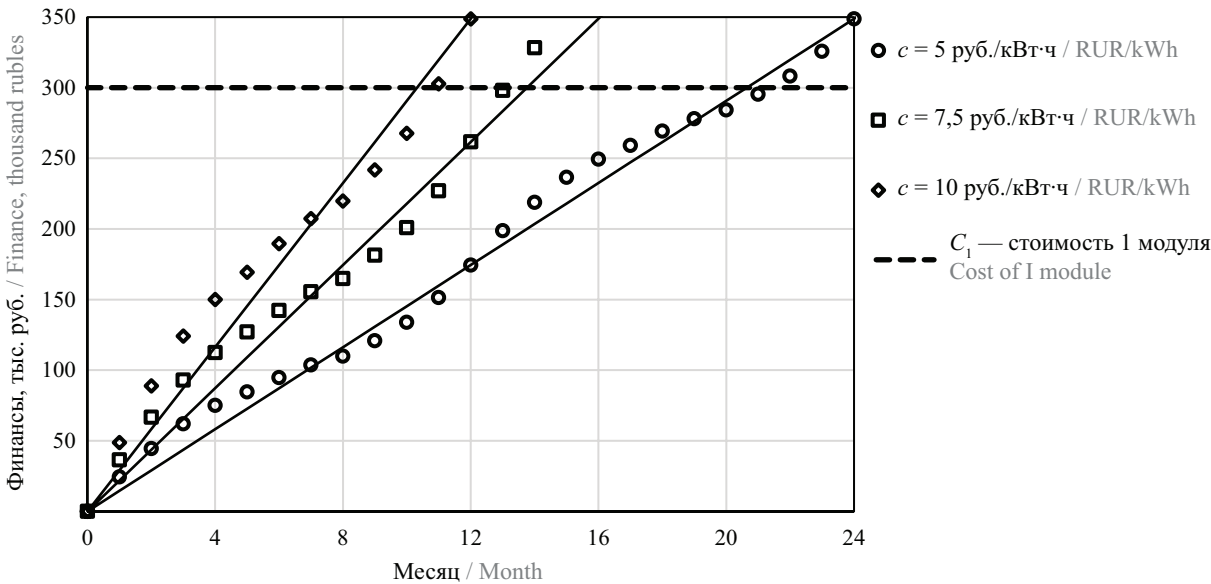


Рис. 8. Экономическая эффективность использования энергии морских волн для обеспечения пресной водой пляжных модульных отелей в прибрежной полосе Черного моря

Fig. 8. Cost-effective use of sea wave energy to provide fresh water for beach modular hotels in the coastal zone of the Black Sea

сной воды, достаточные для значительного числа потребителей (табл. 1, 2). Использование технологии на замерзающих морях обосновано при некруглогодичном режиме работы. Срок окупаемости в зависимости от стоимости электроэнергии не пре-

вышает двух лет без учета сопутствующей снимаемой полезной пневматической мощности. При съеме пневматической мощности с целью генерации полезной тепловой мощности экономическая эффективность технологии увеличивается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Латышева А.А., Мозокина С.Л., Хорева Л.В., Шраер А.В. Инновационные подходы к организации услуг санаторно-курортного туризма // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2022. № 3 (135). С. 82–88. EDN UDKTZN.

2. Петренко А.С. Формирование и управление инвестиционной политикой туристской отрасли в Ростовской области // Перспективы развития индустрии туризма и гостеприимства: теория и практика : сб. тр. Второй Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 52–58. EDN EXNQSE.

3. Giannoukou I., Fafouti E., Halkiopoulos C. Behavior analysis of glamping as a novel tourism marketing trend // Tourism, Travel, and Hospitality in a Smart and Sustainable World. 2023. Pp. 537–562. DOI: 10.1007/978-3-031-29426-6_34

4. Nsafon B.E.K., Owolabi A.B., Butu H.M., Roh J.W., Suh D., Huh J. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation // Energy Strategy Reviews. 2020. Vol. 32. P. 100570. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100570

5. Robertson B., Bekker J., Buckham B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy // Applied Energy. 2020. Vol. 264. P. 114677. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114677

6. Dorofeeva A.R. Towards green travel: application of principles of ecological tourism in the Russian glamping market // European Journal of Tourism, Hospitality and Recreation. 2021. Vol. 11. Issue 2. Pp. 171–180. DOI: 10.2478/ejthr-2021-0016

7. Khan M.Z.A., Khan H.A., Aziz M. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 9. P. 3456. DOI: 10.3390/en15093456

8. Safari M., Sohani A., Sayyaadi H. A higher performance optimum design for a tri-generation system by taking the advantage of water-energy nexus // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124704. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124704

9. Ahmad Z., Shukla A.K., Singh V., Sharma M., Kumar P. Thermodynamic analysis of solar powered tri-generation arrangement for cooling, power and drinking water generation // Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2022. Vol. 44. Issue 6. Pp. 1419–1426. DOI: 10.14456/sjst-psu.2022.184

10. Jahangiri M., Karimi Shahmarvandi F., Alayi R. Renewable energy-based systems on a residen-

tial scale in southern coastal areas of Iran: Trigenation of heat, power, and hydrogen // Journal of Renewable Energy and Environment (JREE). 2021. Vol. 8. Issue 4. Pp. 67–76. DOI: 10.30501/jree.2021.261980.1170

11. Méndez C., Bicer Y. Integrated system based on solar chimney and wind energy for hybrid desalination via reverse osmosis and multi-stage flash with brine recovery // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 44. P. 101080. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101080

12. Idarraga-Mora J.A., Lemelin M.A., Weinman S.T., Husson S.M. Effect of short-term contact with C1–C4 monohydric alcohols on the water permeance of MPD-TMC Thin-Film composite reverse osmosis membranes // Membranes. 2019. Vol. 9. Issue 8. P. 92. DOI: 10.3390/membranes9080092

13. Соловьева З.А. Водный сектор арабских стран: дефицит воды и зеленые технологии // Труды Института востоковедения РАН. 2019. № 22. С. 263–285. EDN MRSRBE.

14. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В., Чернышова Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. СПб. : Рос-сийский морской регистр судоходства, 2006. 452 с.

15. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышова Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей. СПб. : Рос-сийский морской регистр судоходства, 2009. 356 с.

16. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. Vol. 14. Issue 11. Pp. 2883–2897. DOI: 10.5194/nhess-14-2883-2014

17. Гиппиус Ф.Н., Архипкин В.С., Суркова Г.В. Режим ветрового волнения на Черном море по данным ретроспективных расчетов // Комплексные исследования морей России: оперативная океано-графия и экспедиционные исследования : мат. мол. науч. конф. 2016. С. 270. EDN WBHPRR.

18. Rusu L. The wave and wind power potential in the western Black Sea // Renewable Energy. 2019. Vol. 139. Pp. 1146–1158. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.017

19. Bingölbalı B., Jafali H., Akpınar A., Bekiroğlu S. Wave energy potential and variability for the south west coasts of the Black Sea: The WEB-based wave energy atlas // Renewable Energy. 2020. Vol. 154. Pp. 136–150. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.014

20. Kamranzad B., Takara K. A climate-dependent sustainability index for wave energy resources in Northeast Asia // *Energy*. 2020. Vol. 209. P. 118466. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118466.

21. Плотников В.В., Четырбоцкий А.Н., Гордейчук Т.В. Оценка состояния ледяного покрова Японского моря // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 3. С. 46–55. EDN MBBUPP.

Поступила в редакцию 10 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 16 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 10 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Владимирович Миронов** — доктор технических наук, профессор кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 384652, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AАН-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Юрий Андреевич Иванюшин — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 758082, Scopus: 56199460900, ResearcherID: V-9425-2019, ORCID: 0000-0002-4470-6967; ivanjushin@tyuiu.ru;

Даниил Алексеевич Суглобов — аспирант; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; инженер-проектировщик водоснабжения и канализации; **Югорский проектный институт**; 625002, г. Тюмень, ул. Комсомольская, д. 60, suglobovda@gmail.com;

Дмитрий Викторович Миронов — кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер; **ЭЛЕКТРОРАМ**; 625023, г. Тюмень, ул. Пржевальского, д. 33, корп. 1, кв. 79; dvmironov@yandex.ru;

Лев Игоревич Максимов — инженер центра перспективных исследований и инновационных разработок; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 850735, Scopus: 57190855057, ResearcherID: B-9883-2016, ORCID: 0000-0001-6915-4778; maksimovli@tyuiu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Latysheva A.A., Mozokina S.L., Khoreva L.V., Shraer A.V. Innovative approaches to the organization of services of sanatorium tourism. *News of the St. Petersburg State University of Economics*. 2022; 3(135):82-88. EDN UDKTZN. (rus.).

2. Petrenko A.S. Formation and management of investment policies of tourism industry in Rostov region. *Prospects for the development of the tourism and hospitality industry: theory and practice : collection of proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference*. 2019; 52-58. EDN EXNQSE. (rus.).

3. Giannoukou I., Fafouti E., Halkiopoulos C. Behavior analysis of glamping as a novel tourism marketing trend. *Tourism, Travel, and Hospitality in a Smart and Sustainable World*. 2023; 537-562. DOI: 10.1007/978-3-031-29426-6_34

4. Nsafon B.E.K., Owolabi A.B., Butu H.M., Roh J.W., Suh D., Huh J. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation. *Energy Strategy Reviews*. 2020; 32:100570. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100570

5. Robertson B., Bekker J., Buckham B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy. *Applied Energy*. 2020; 264:114677. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114677

6. Dorofeeva A.R. Towards green travel: application of principles of ecological tourism in the Russian glamping market. *European Journal of Tourism, Hospitality and Recreation*. 2021; 11(2):171-180. DOI: 10.2478/ejthr-2021-0016

7. Khan M.Z.A., Khan H.A., Aziz M. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives. *Energies*. 2022; 15(9):3456. DOI: 10.3390/en15093456

8. Safari M., Sohani A., Sayyaadi H. A higher performance optimum design for a tri-generation system by taking the advantage of water-energy nexus. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 284:124704. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124704

9. Ahmad Z., Shukla A.K., Singh V., Sharma M., Kumar P. Thermodynamic analysis of solar powered tri-generation arrangement for cooling, power and drinking water generation. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*. 2022; 44(6):1419-1426. DOI: 10.14456/sjst-psu.2022.184

10. Jahangiri M., Karimi Shahmarvandi F., Alayi R. Renewable energy-based systems on a residential scale in southern coastal areas of Iran: Trigenation of heat, power, and hydrogen. *Journal of Renewable Energy and Environment (JREE)*. 2021; 8(4):67-76. DOI: 10.30501/jree.2021.261980.1170

11. Méndez C., Bicer Y. Integrated system based on solar chimney and wind energy for hybrid desalination

via reverse osmosis and multi-stage flash with brine recovery. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021; 44:101080. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101080

12. Idarraga-Mora J.A., Lemelin M.A., Weinman S.T., Husson S.M. Effect of short-term contact with C1–C4 monohydric alcohols on the water permeance of MPD-TMC Thin-Film composite reverse osmosis membranes. *Membranes*. 2019; 9(8):92. DOI: 10.3390/membranes9080092

13. Solovieva Z. Water sector of the Arab countries: water deficit and green technologies. *Proceedings of the Institute of Oriental Studies of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 22:263-285. EDN MRSRBE. (rus.).

14. Lopatukhin L.I., Bukhanovskiy A.V., Ivanov S.V., Chernyshova E.S. *Reference data on the wind and wave regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean seas*. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2006; 452. (rus.).

15. Lopatukhin L.I., Bukhanovskiy A.V., Chernyshova E.S. *Reference data on the wind and wave regime of the Japan and Kara Seas*. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2009; 356. (rus.).

16. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P., Surkova G.V. Wind waves in the Black

Sea: results of a hindcast study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014; 14(11):2883-2897. DOI: 10.5194/nhess-14-2883-2014

17. Gippius F.N., Arkhipkin V.S., Surkova G.V. Wind wave regime in the Black Sea according to retrospective calculations. *Comprehensive studies of the seas of Russia : proceedings of the youth scientific conference*. 2016; 270. EDN WBHPRR. (rus.).

18. Rusu L. The wave and wind power potential in the western Black Sea. *Renewable Energy*. 2019; 139:1146-1158. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.017

19. Bingölbali B., Jafali H., Akpınar A., Bekiroğlu S. Wave energy potential and variability for the south west coasts of the Black Sea: The WEB-based wave energy atlas. *Renewable Energy*. 2020; 154:136-150. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.014

20. Kamranzad B., Takara K. A climate-dependent sustainability index for wave energy resources in Northeast Asia. *Energy*. 2020; 209:118466. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118466

21. Plotnikov V.V., Gordeichuk T.V., Chetyrbotskii A.N. Estimation of the state of ice cover in the sea of Japan. *Meteorology and Hydrology*. 2010; 3:46-55. EDN MBBUPP. (rus.).

Received October 10, 2023.

Adopted in revised form on October 16, 2023.

Approved for publication on January 10, 2024.

B I O N O T E S: **Viktor V. Mironov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 384652, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AAH-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Yuriy A. Ivanyushin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 758082, Scopus: 56199460900, ResearcherID: V-9425-2019, ORCID: 0000-0002-4470-6967; ivanjushin@tyuiu.ru;

Daniil A. Suglov — postgraduate student; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; water supply and sewerage design engineer; **Yugra Design Institute**; 60 Komsomolskaya st., Tyumen, 625002, Komsomolskaya st., Russian Federation; suglovda@gmail.com;

Dmitriy V. Mironov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, lead engineer; **ELECTRORAM**; 79, frame 1, 33 Przhevalskogo st., Russian Federation; dvmironov@yandex.ru;

Lev I. Maksimov — engineer at the Center for Advanced Research and Innovative Development; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 850735, Scopus: 57190855057, ResearcherID: B-9883-2016, ORCID: 0000-0001-6915-4778; maksimovli@tyuiu.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.631-644

Учет влияния неоднородностей в стеновой панели на величину сопротивления теплопередаче

Самвел Володяевич Саргсян, Вера Валерьевна Агафонова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные требования по повышению энергетической эффективности жизнедеятельности и снижению энергопотребления зданий в целом диктуют разработку новых конструкций, имеющих одновременно высокие теплозащитные и прочностные характеристики. К числу конструкций такого типа относятся многослойные стеновые панели с заполнителем из различных высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Проведен анализ эффективности принятых решений по использованию минераловатных заполнителей в двухслойной стеновой панели при различной толщине слоя наружного утеплителя.

Материалы и методы. Использованы действующие нормативные документы в части обеспечения тепловой защиты ограждающих конструкций. Расчеты проводились с помощью численного моделирования в среде программного комплекса (ПК) COMSOL Multiphysics, а также инженерно-аналитическим методом расчета, представленным в нормативной литературе.

Результаты. Рассмотрены варианты устройства фасадной стены с различными толщинами слоя наружного утеплителя в сочетании с двухслойной стеновой панелью. Путем численного моделирования установлен характер распределения температур по толщине рассматриваемой конструкции стеновой панели. Выполнен анализ влияния неоднородных теплотехнических включений на эквивалентное сопротивление теплопередаче двухслойной стеновой панели.

Выводы. Результаты проведенного инженерно-аналитического расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели, а также численного моделирования в среде ПК COMSOL Multiphysics позволяют получить уточненную величину сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели, что способствует определению минимальной толщины слоя наружного утеплителя в зависимости от климатической зоны строительства. Применение заполнителей из минераловатных плит в конструкции двухслойных стеновых панелей увеличивает эквивалентное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции. Приведен пример расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели, позволяющей более точно определить минимальную толщину слоя наружного утеплителя. Предлагаемая методика расчета дает возможность существенно снизить затраты на единицу площади стеновой панели при организации утепления фасада жилого здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многослойная ограждающая конструкция, двухслойная стеновая панель, сопротивление теплопередаче, теплопроводность, плитный утеплитель, минераловатная плита, фасадная конструкция, теплопроводное включение, численное моделирование

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за замечания по стилю изложения и по научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саргсян С.В., Агафонова В.В. Учет влияния неоднородностей в стеновой панели на величину сопротивления теплопередаче // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 631–644. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.631-644

Автор, ответственный за переписку: Вера Валерьевна Агафонова, agafonovavv@mgsu.ru.

Consideration of the effect of inhomogeneities in the wall panel on the value of heat transfer resistance

Samvel V. Sargsyan, Vera V. Agafonova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern requirements for improving the energy efficiency of life and reducing energy consumption of buildings in general dictate the development of new modern structures with high thermal protection and strength characteristics. Structures of this type include multilayer wall panels with a filler made of various highly effective thermal insulation materials. The analysis of the effectiveness of the decisions taken on the use of mineral wool fillers in a two-layer wall panel with different thickness of the outer insulation layer is carried out.

Materials and methods. The current regulatory documents regarding the provision of thermal protection of enclosing structures were used. The calculations were carried out using numerical modelling in the COMSOL Multiphysics software package, as well as by the analytical calculation method presented in the normative literature.

Results. The variants of the facade wall arrangement with different thicknesses of the external insulation layer in combination with a two-layer wall panel are considered. By conducting numerical modelling, the character of temperature distribution along the thickness of the wall panel structure under consideration is established. The analysis of the influence of inhomogeneous thermal inclusions on the equivalent heat transfer resistance of a two-layer wall panel is carried out.

Conclusions. The results of the engineering and analytical calculation of the equivalent heat transfer resistance of a two-layer wall panel, as well as numerical modelling in the COMSOL Multiphysics software package, allow to obtain an updated value of the heat transfer resistance of a two-layer wall panel, which helps to determine the minimum thickness of the outer insulation layer depending on the climatic zone of construction. The use of mineral wool fillers in the construction of double-layer wall panels increases the equivalent heat transfer resistance of the enclosing structure. An example of calculation of the equivalent heat transfer resistance of a two-layer wall panel is given, which makes it possible to determine more accurately the minimum thickness of the outer insulation layer. The proposed calculation method allows to reduce significantly the cost per unit area of the wall panel when organizing the insulation of the facade of a residential building.

KEYWORDS: multilayer enclosing structure, two-layer wall panel, heat transfer resistance, thermal conductivity, slab insulation, mineral wool slab, facade structure, thermal conductive inclusion, numerical modelling

Acknowledgements. The authors thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, contributing to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

FOR CITATION: Sargsyan S.V., Agafonova V.V. Consideration of the effect of inhomogeneities in the wall panel on the value of heat transfer resistance. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):631-644. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.631-644 (rus.).

Corresponding author: Vera V. Agafonova, agafonovavv@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение в отечественной и зарубежной практике промышленного и гражданского строительства получили многослойные наружные ограждающие конструкции. Среди них выделяют железобетонные стеновые панели, средний слой которых выполнен из материала, имеющего низкую теплопроводность: минераловатные плиты, экструдированный пенополистирольный наполнитель, ячеистый бетон и т.д. Отличительной особенностью таких конструкций является малый вес, простота транспортировки и монтажа. Кроме того, многослойные стеновые панели отличаются повышенной энергоэффективностью за счет использования высококачественных наполнителей.

Двухслойные и трехслойные стеновые панели могут применяться как часть крупногабаритного модуля повышенной заводской готовности¹ при строительстве быстровозводимых жилых, общественных и административных зданий, складских помещений и промышленных зданий [1, 2].

Применение многослойных стеновых панелей позволяет в кратчайшие сроки возводить здания, что играет важную роль при восстановлении жилья в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [3]. Так, в одном из регионов страны здание временной больницы на 1000 мест и изолятор на 10 000 коек были возведены всего за 51 сут, при этом использовались модули заводского изготовления, состоящие из двухслойных стеновых панелей с эффективным утеплителем.

Вопросу использования на практике многослойных ограждающих конструкций посвящено

достаточное количество публикаций [4–6]. В работе [4] проведен сравнительный анализ энергоэффективности наружных ограждающих конструкций, выполненных как из традиционных материалов — кирпича, монолитного железобетона, так и новых типов конструкций — трехслойных стеновых панелей с наполнителем из ячеистого теплоизоляционного строительного материала. Сделан вывод о пониженных тепловых потерях и, как следствие, снижении затрат на отоплении при использовании трехслойных стеновых панелей в каркасно-панельном домостроении.

Возможность применения сэндвич-панелей при строительстве в климатических условиях Сибири была обоснована численными расчетами [5]. Проведены подробные исследования динамики изменения теплофизических характеристик двухслойной стеновой панели с композитным наполнителем применительно к климатическим условиям Аляски [6]. Получены результаты, указывающие на повышение энергосбережения здания в целом при использовании многослойных стеновых панелей.

Для сокращения потребности энергии необходимо принятие решений, приводящих к снижению энергопотребления зданий в целом, повышению энергетической эффективности жизнедеятельности и энергосбережению [7–20]. Обоснованные расчеты по определению толщины теплоизоляционного слоя фасадной конструкции — один из важных шагов в этом направлении.

Совмещение в двухслойных стеновых панелях одновременно теплозащитных и прочностных характеристик — характерная особенность этой конструкции. Двухслойная стеновая панель в сложном многослойном ограждении фасадной конструкции наружной стены является одним из слоев, где

¹ СП 501.1325800.2021. Здания из крупногабаритных модулей.

теплозащитную функцию обеспечивает наружный теплоизоляционный слой².

Расчет с целью точного определения сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели дает возможность установить минимальную толщину наружного слоя теплоизоляционного материала, обеспечивающую требование к фасадной конструкции в целом по энергосбережению.

Представлена подробная методика теплотехнического расчета сложной фасадной конструкции со слоями утеплителя и двухслойной стеновой панелью, позволяющая точно определить толщину наружного теплоизоляционного слоя.

Выполнен сравнительный анализ проведенных расчетов двумя методами: инженерно-аналитическим методом расчета, представленным в нормативной литературе, и расчетом с помощью численного моделирования в среде программного комплекса (ПК) COMSOL Multiphysics [21].

Приведен расчет сопротивления теплопередачи двухслойной стеновой панели с заданными размерами теплотехнических неоднородностей, с учетом которого установлена минимально допустимая величина толщины слоя наружного утеплителя стеновой панели жилого здания для условий проектирования и строительства в климатическом районе г. Москвы.

² СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.

Цель исследования — определение возможности уменьшения слоя наружного утеплителя двухслойной стеновой панели в крупногабаритном модуле на предмет теплопроводности и сокращения слоя утеплителя при устройстве фасадного пирога; изучение теплофизических характеристик двухслойных стеновых панелей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемая в работе двухслойная стеновая панель представляет собой конструкцию, выполненную из бетона класса В70, толщиной 0,16 м с заполнителем межреберного пространства из жестких минераловатных плит толщиной 0,1 м. С целью обеспечения необходимых теплоизолирующих свойств стеновых панелей используется дополнительный наружный утеплитель из минераловатных плит с меньшей плотностью. Общий вид и разрез стеновой панели представлены на рис. 1.

Стеновая панель показана на рис. 2. Выделены три регулярных элемента стеновой панели А, Б и В с характерными размерами по отдельным сечениям: А — однородный участок стеновой панели, состоящий из слоя железобетона; Б и В — неоднородные участки, состоящие из слоя железобетона с минераловатными плитами в качестве заполнителя.

Расчеты проведены в условиях климатического района строительства г. Москвы, объектом исследо-

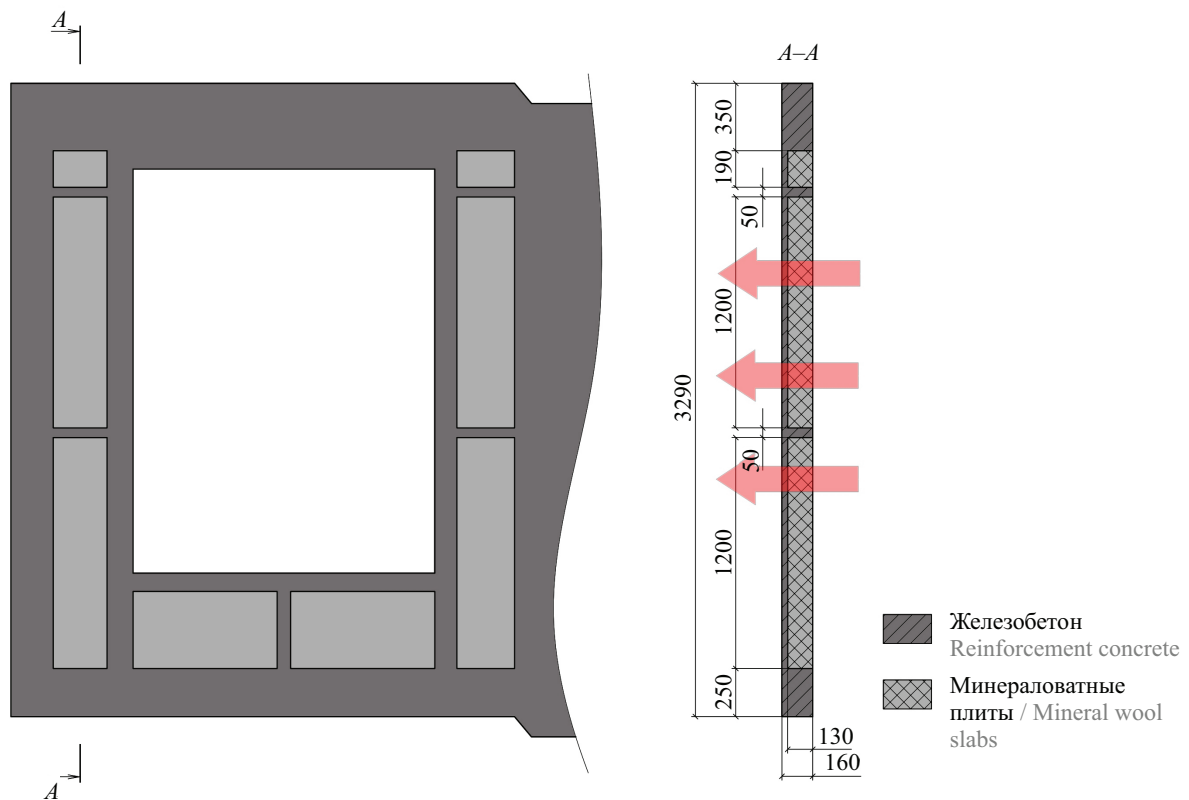


Рис. 1. Конструкция двухслойной стеновой панели

Fig. 1. Two-layer wall panel design

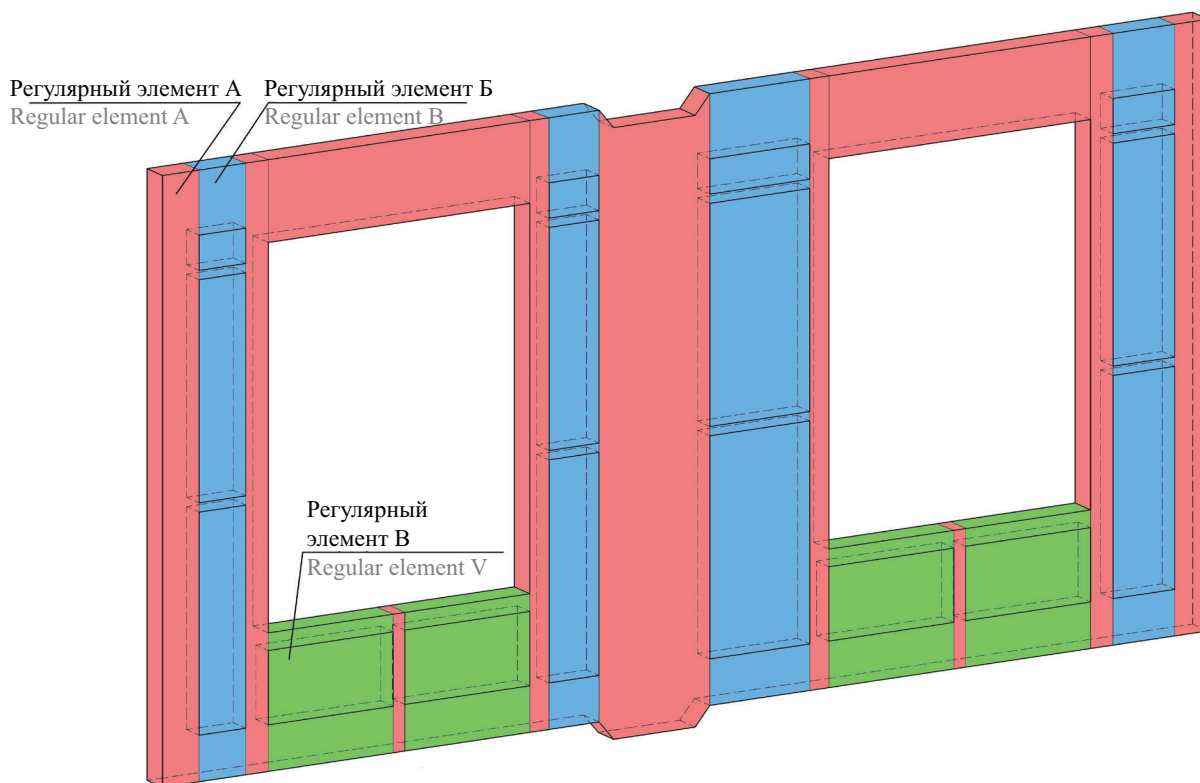


Рис. 2. Схема разбивки двухслойной стеновой панели на регулярные элементы

Fig. 2. Scheme of dividing a two-layer wall panel into regular elements

вания стала сборная железобетонная стеновая панель для жилого здания.

Условная величина сопротивления теплопередаче многослойной конструкции ограждения R_0 в наиболее общем случае:

$$R_0 = 1/\alpha_{\text{в}} + R_1 + R_2 + R_{\text{вп}} + \dots + R_i + 1/\alpha_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициенты теплоотдачи соответственно внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C); $1/\alpha_{\text{в}} = R_{\text{в}}$, $1/\alpha_{\text{н}} = R_{\text{н}}$ — сопротивление теплопередаче соответственно внутренней и наружной поверхности ограждения; $R_1, R_2, \dots, R_i$ — термическое сопротивление отдельного i -го слоя ограждающей конструкции, м²·°C/Вт, определяемое как:

$$R_i = \delta_i / \lambda_i,$$

где δ_i — толщина i -го слоя конструкции, м; λ_i — расчетный коэффициент теплопроводности материала i -го слоя конструкции, Вт/(м·°C); $R_{\text{вп}}$ — термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки¹, м²·°C/Вт.

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, в которых материал неоднороден как в параллельном, так и в перпендикулярном к тепловому потоку направлениях, устанавливается следующей последовательностью [10]:

- плоскостями, параллельными направлению теплового потока, ограждающая конструкция разделяется на характерные в теплотехническом отношении участки, состоящие из одного или нескольких

слоев. Определяется термическое сопротивление теплопередаче $R_{\text{пар}}$:

$$R_{\text{пар}} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \dots + \frac{A_n}{R_n}}, \quad (2)$$

где $A_1, A_2, \dots, A_n$ — площади отдельных участков по поверхности ограждающей конструкции при разбиении ее плоскостями, параллельными тепловому потоку, м²; $R_1, R_2, \dots, R_n$ — термическое сопротивление отдельных участков ограждающей конструкции, но без сопротивления теплоотдаче $R_{\text{н}}$, $R_{\text{в}}$, м²·°C/Вт;

- плоскостями, перпендикулярными к направлению теплового потока, ограждающая конструкция разделяется на однородные и разнородные слои. Термическое сопротивление однородных слоев вычисляется по формуле (1) без учета сопротивления теплоотдаче $R_{\text{н}}$, $R_{\text{в}}$, неоднородных — по формуле (2). Термическое сопротивление $R_{\text{пер}}$ устанавливается как сумма термических сопротивлений однородных и неоднородных слоев;

- окончательно действительное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определяется как:

$$R = \frac{R_{\text{пар}} + 2 \cdot R_{\text{пер}}}{3}. \quad (3)$$

Термическое сопротивление ограждающих конструкций, у которых $R_{\text{пар}}$ более чем на 25 % пре-

вышает $R_{пер}$, определяют расчетом их температурных полей.

Результаты расчета сопротивления теплопередаче регулярных элементов стеновой панели, определенных инженерно-аналитическим способом [10], представлены в табл. 1.

Окончательно определяется эквивалентное значение сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели:

$$R_{эк} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}.$$

(4)

Проведенный анализ по установлению аналитическим способом сопротивления теплопередаче рассматриваемой двухслойной стеновой панели показал, что сопротивление теплопередаче двухслойной стеновой панели (без учета наружного утеплителя) составляет $R_{эк} = 0,39 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, а требуемое сопротивление теплопередаче конструкции наружной стены — $R_{тр} = 3,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

Следовательно, при уменьшении толщины наружного утеплителя до значения $\delta_{ут} = 0,12 \text{ м}$, $\lambda_{ут} = 0,042 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ будет выполняться требование:

$$R_0^{np1} \geq R_0^{тр}.$$

Неоднородный участок, состоящий из слоя железобетона с заполнителем из минераловатных плит:

$$R_0^{np1} = 0,39 + \frac{0,12}{0,042} = 3,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$R_0^{np1} = 3,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} \geq R_0^{тр} = 3,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Однородный участок, состоящий из слоя железобетона:

$$R_0^{np2} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,16}{2,04} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,12}{0,042} + \frac{1}{12} = 3,16 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$R_0^{np2} = 3,16 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} \geq R_0^{тр} = 3,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Аналитический расчет термического сопротивления двухслойной стеновой панели с заполнителем из минераловатных плит показал допустимость уменьшения слоя наружного утеплителя стеновой панели до значения $\delta_{ут} = 0,12 \text{ м}$.

С целью проведения анализа теплопроводности двухслойной стеновой панели на предмет уменьшения слоя утеплителя при устройстве фасадного пирога выполнено численное моделирование в ПК COMSOL Multiphysics. Была рассмотрена двух-

Табл. 1. Сопротивление теплопередаче регулярных элементов стеновой панели

Table 1. Heat transfer resistance of regular wall panel elements

Зона стеновой панели с регулярным элементом Wall panel area with a regular element	Площадь стеновой панели с сечением, аналогичным сечению регулярного элемента, м ² The area of a wall panel with a cross section similar to that of a regular element, m ²	Сопротивление теплопередаче R , м ² ·°C/Вт Heat transfer resistance R , m ² ·°C/W
А A	6,58	0,298
Б B	5,09	0,52
В V	2,26	0,37

Табл. 2. Теплотехнические показатели материалов слоев двухслойной стеновой панели

Table 2. Thermal characteristics of the materials of the layers of a two-layer wall panel

Материал слоя Layer material	Плотность материала ρ , кг/м ³ The density of the material ρ , kg/m ³	Теплопроводность λ_b , Вт/м·°C Thermal conductivity λ_b , W/m·°C	Толщина слоя δ , м Layer thickness δ , m	Удельная теплоемкость c , кДж/кг·°C Specific heat capacity c , kJ/kg·°C
Наружный утеплитель из минераловатных плит External insulation made of mineral wool slabs	130	0,042	0,15/0,13/0,12/0,1	0,84
Заполнитель из минераловатных плит Filler made of mineral wool slabs	150	0,046	0,1	0,84
Железобетон Reinforced concrete	2500	2,04	0,03 0,03	0,84
Внутренняя отделка Interior decoration	1800	0,93	0,02	0,88

слойная стеновая панель с заполнителем из минераловатных плит для различных толщин фасадного утеплителя снаружи:

- без наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,0$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,15$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,13$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,12$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,11$ м.

Теплотехнические показатели материалов слоев рассматриваемой двухслойной стеновой панели представлены в табл. 2.

Расчет выполнен для холодного периода года, как наиболее опасный с точки зрения возможности выпадения конденсата в толще наружной ограждающей конструкции. При моделировании процесса теплопередачи задача решена в стационарной трехмерной постановке.

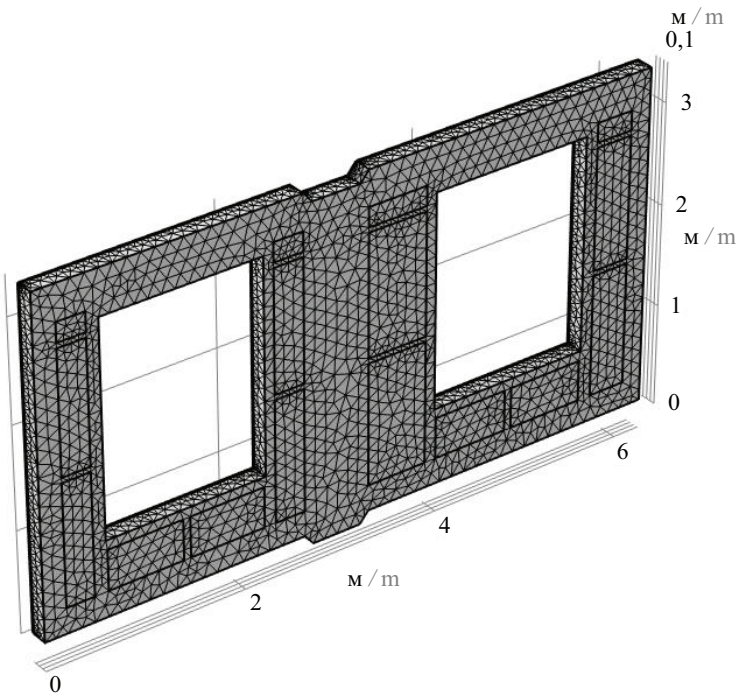


Рис. 3. Конечно-элементная модель расчетной области
Fig. 3. Finite element model of the computational domain

Табл. 3. Климатические условия района строительства
Table 3. Climatic conditions of the construction area

Параметры Parameters	Значение параметров The value of the parameters	Нормативный документ Regulatory document
Район строительства Construction area	Москва Moscow	
Средняя температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 The average temperature of the coldest five-day period with a probability of 0.92	-26 °C	СП 131.13330.2020 SP 131.13330.2020
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период Average outdoor temperature during the heating period	-2,7 °C	
Продолжительность отопительного периода Duration of the heating period	209 суток 209 days	
Влажностный режим помещения Humidity conditions of the room	Нормальный Normal	СП 50.13330.2012 SP 50.13330.2012
Условия эксплуатации ограждающих конструкций Operating conditions of enclosing structures	Б B	
Расчетная температура внутреннего воздуха для жилых помещений Estimated indoor air temperature for residential premises	+20 °C	ГОСТ 30494–2011 GOST 30494–2011

Определены параметры наружного воздуха для условий проектирования и строительства жилого здания в климатическом районе г. Москвы, для которого средняя температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 составляет $t_n = -26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹.

При расчете исследуемая конструкция изображалась в виде трехмерных твердых тел с заданными теплотехническими характеристиками. На поверхностях конструкции задавались граничные условия III рода — расчетная температура наружного и внутреннего воздуха, коэффициенты теплоотдачи: $t_n = -26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha_n = 23\text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$; $t_v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha_v = 8,7\text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$.

Исходная твердотельная 3D-модель стеновой панели выполнена в среде ПК COMSOL Multiphysics. Конечно-элементная модель двухслойной стеновой панели представлена на рис. 3.

Климатические условия района строительства представлены в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведенной серии численных расчетов при различных вариантах толщины наружного утеплителя получены следующие результаты:

- установлен характер распределения температур по толщине рассматриваемой конструкции;
- определены минимальные значения температуры на внутренней поверхности стеновой панели для различных вариантов расчета.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 4–8. На рис. 4, 5 показаны температурные поля на внутренней и наружной поверхностях двухслойной стеновой панели для двух вариантов расчета: без наружного утеплителя и с наружным утеплителем толщиной 0,12 м. На данных

рисунках справа представлена температурная шкала t , $^{\circ}\text{C}$.

На рис. 6 приведены изотермы в плоскости стеновой панели, проходящей через участок с теплоизоляционными включениями из минераловатных плит (регулярный элемент Б). Также на рис. 6 показаны сечения 1 и 2, используемые для анализа характера распределения температур по толщине конструкции.

На рис. 7 представлены графики изменения температуры: по сечению 1 — через слой с теплоизоляционными включениями, по сечению 2 — через однородный участок стеновой панели.

Результаты проведенного численного моделирования в среде ПК COMSOL Multiphysics с различными вариантами толщины наружного утеплителя представлены в табл. 4 и на рис. 8.

Результат расчета показал, что участки стеновой панели без вкладышей из минераловатных плит являются теплопроводными включениями. Температура на внутренней поверхности стены по сечению 1 (слой железобетона с заполнителем из минераловатных плит) составляет $t_{\text{в.пов.сечение 1}} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура на внутренней поверхности стены по сечению 2 (слой железобетона) составляет $t_{\text{в.пов.сечение 2}} = 4,26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так как нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции для жилых зданий не должен превышать $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹, необходимо предусмотреть наружный утеплитель совместно с двухслойными стеновыми панелями.

Данные результатов численного расчета, представленные в табл. 3 и на рис. 8, позволяют исключить возможность применения двухслойной стеновой панели без наружного утеплителя. Для расчетных вариантов с толщиной наружного утеплителя

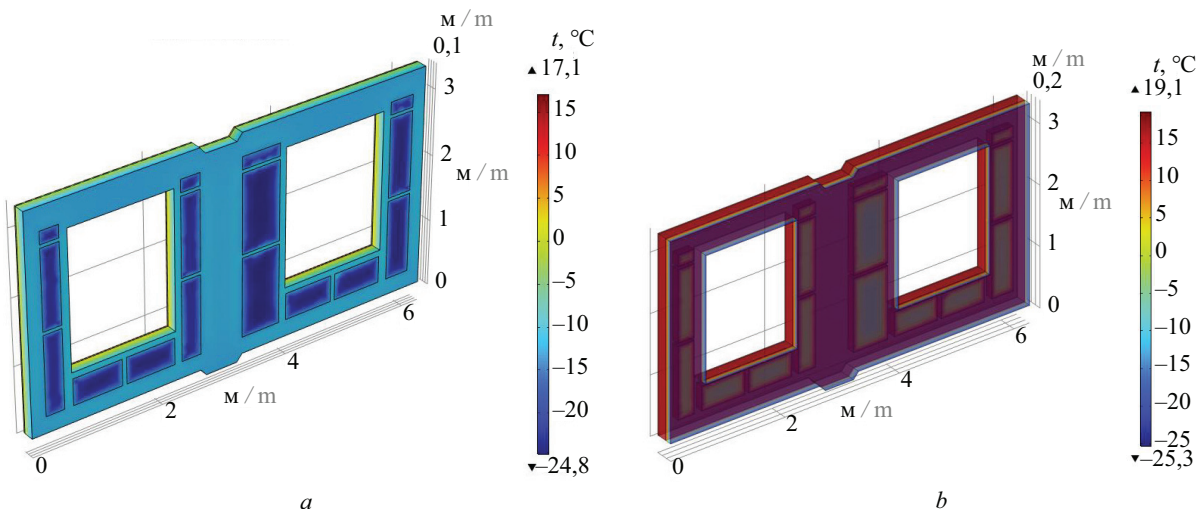


Рис. 4. Температурные поля двухслойной стеновой панели: а — без наружного утеплителя; б — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м (вид на наружную поверхность)

Fig. 4. Temperature fields of a two-layer wall panel: а — without external insulation; б — with external insulation, 0.12 m thick (view of the outer surface)

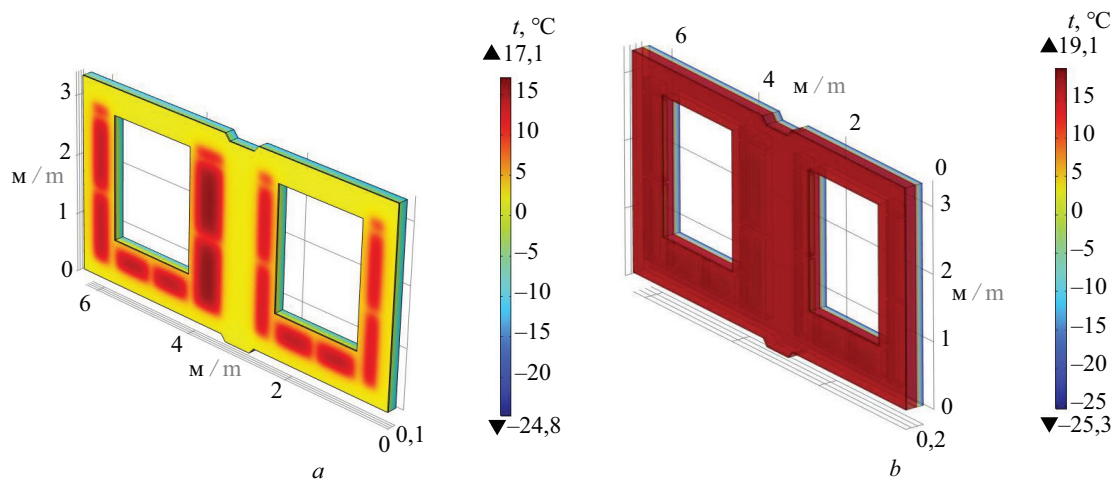


Рис. 5. Температурные поля двухслойной стеновой панели: *a* — без наружного утеплителя; *b* — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м (вид на внутреннюю поверхность)
Fig. 5. Temperature fields of a two-layer wall panel: *a* — without external insulation; *b* — with external insulation, 0.12 m thick (view of the inside surface)

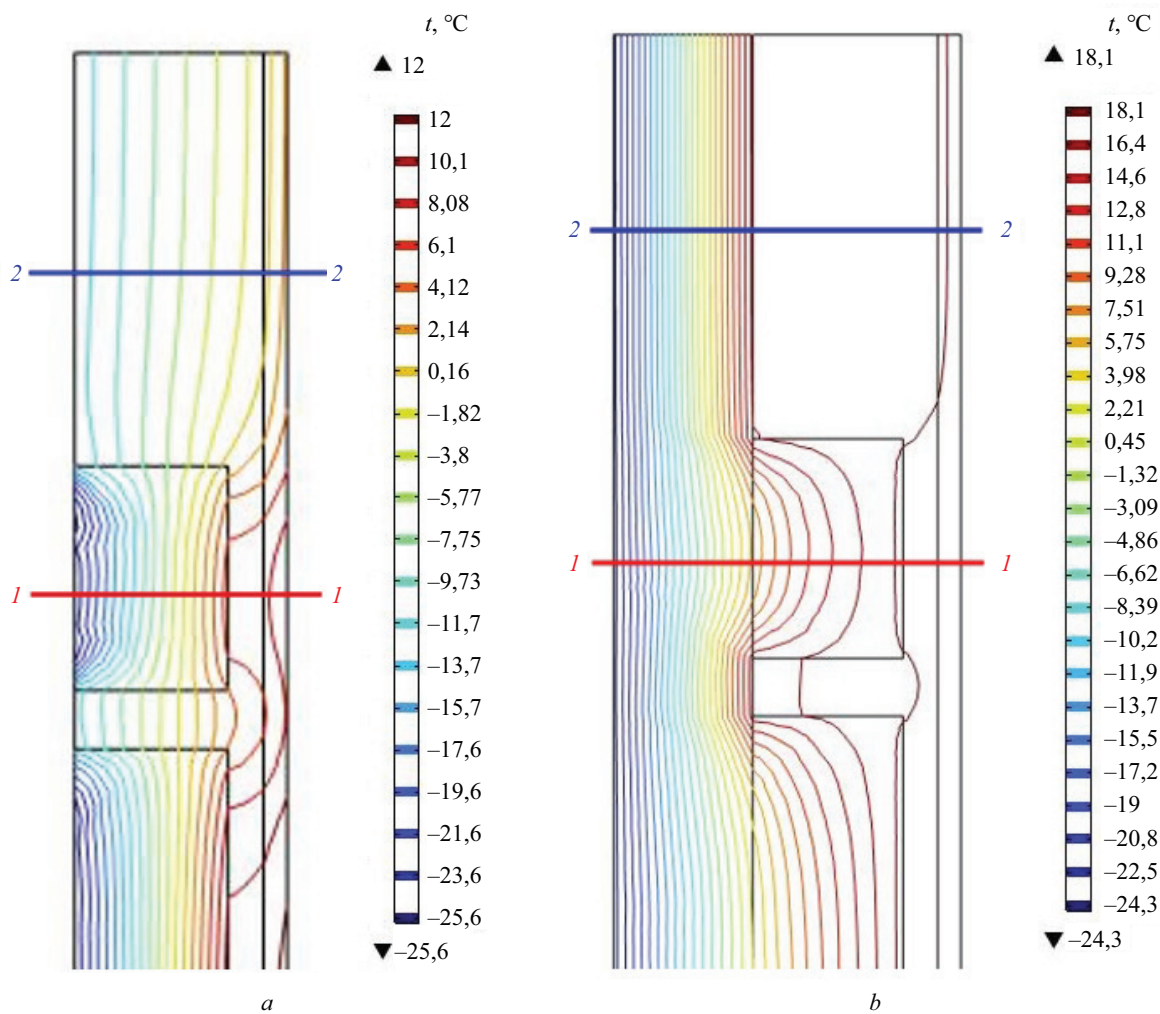


Рис. 6. Изотермы (регулярный элемент Б): *a* — без наружного утеплителя; *b* — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м
Fig. 6. Isotherms (regular element B): *a* — without external insulation; *b* — with external insulation, 0.12 m thick

от $\delta_{\text{ут}} = 0,11$ м до $\delta_{\text{ут}} = 0,15$ м нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности

наружной ограждающей конструкции обеспечивается до $\Delta t = 4$ °С, что допускает применение всех рассмотренных вариантов толщины наружно-

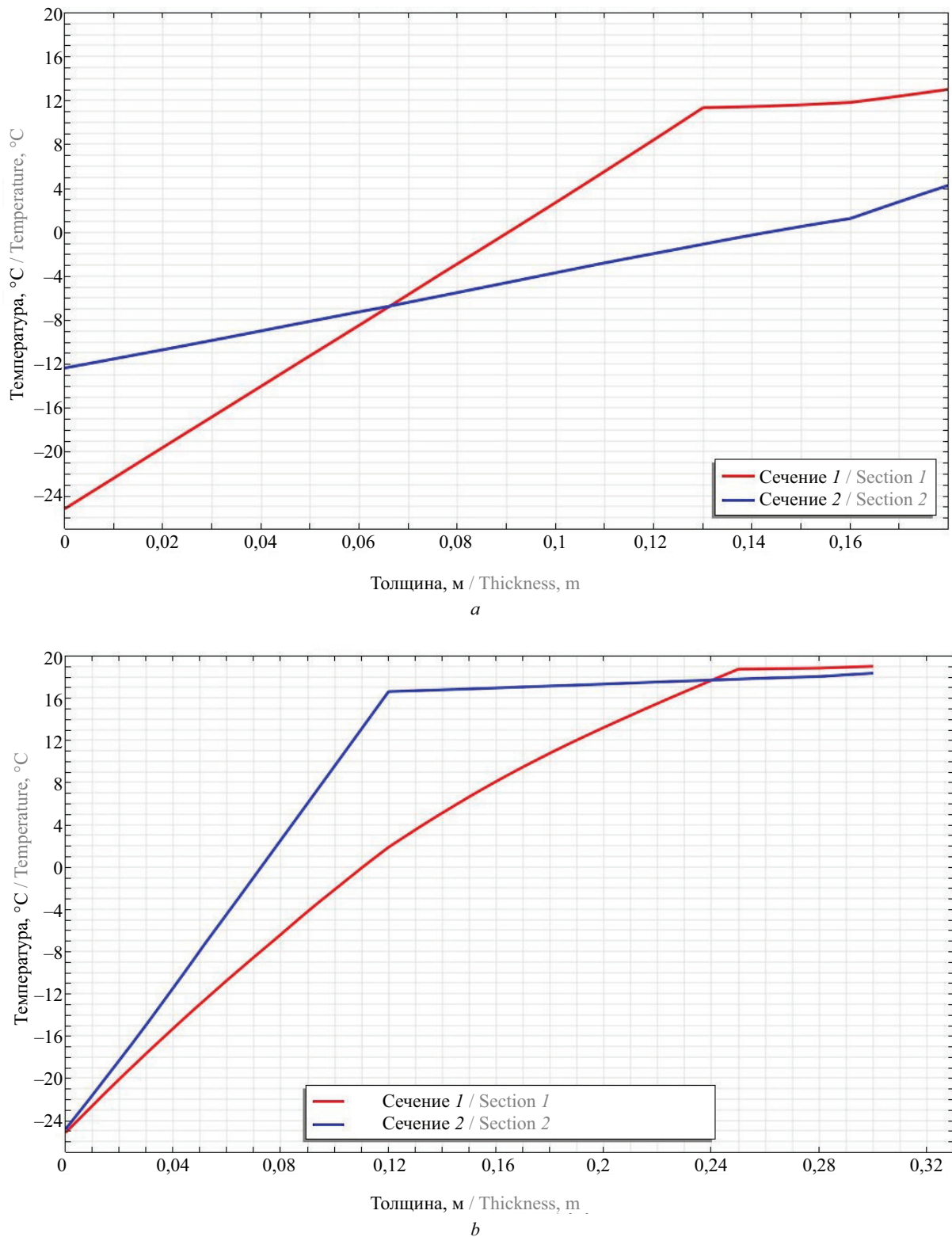


Рис. 7. График изменения температуры по сечениям 1 и 2 двухслойной стеновой панели: *a* — без наружного утеплителя; *b* — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м

Fig. 7. Graph of temperature changes across sections 1 and 2 of a two-layer wall panel: *a* — without external insulation; *b* — with external insulation, 0.12 m thick

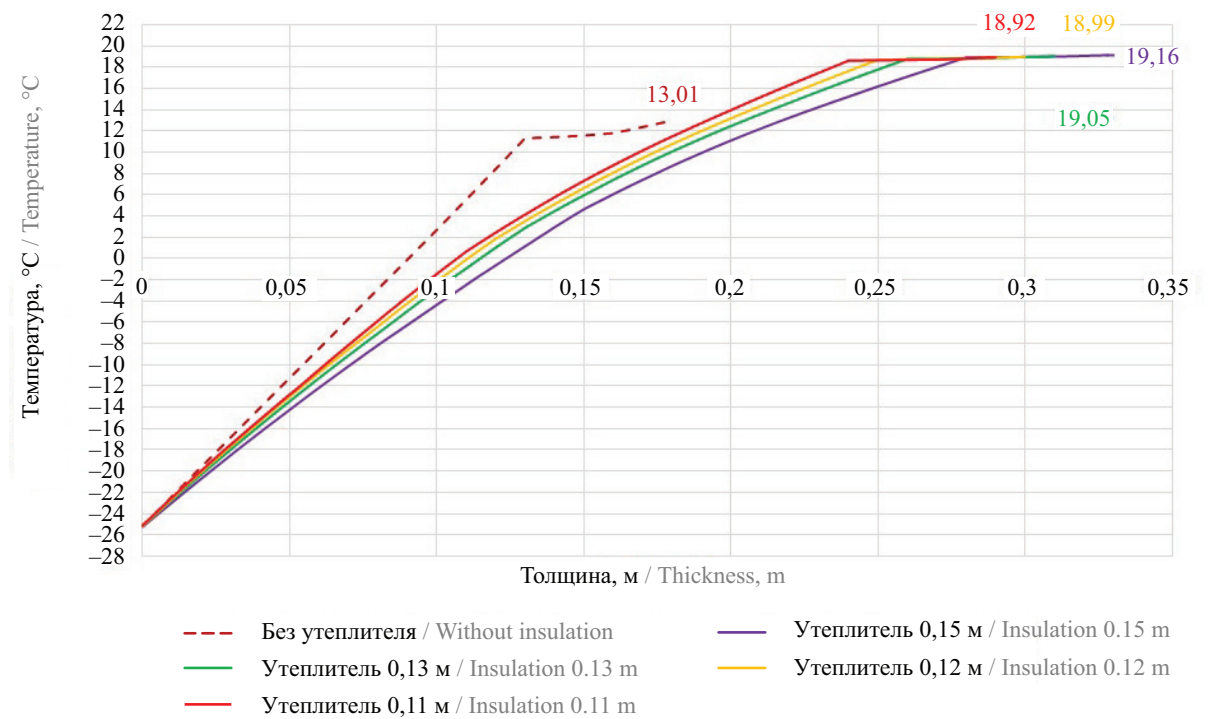


Рис. 8. Распределение температуры по толщине сечения l двухслойной стеновой панели с различными вариантами толщины наружного утеплителя

Fig. 8. Temperature distribution along the thickness of section l of a two-layer wall panel with different thicknesses of external insulation

Табл. 4. Минимальные значения температуры на внутренней поверхности двухслойной стеновой панели при различных вариантах толщины наружного утеплителя в сечениях l и 2

Table 4. Minimum temperature values on the inner surface of a two-layer wall panel for different thicknesses of external insulation in sections l and 2

Вариант расчета Calculation option	$t_{\text{в.пов сечение 1}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{v.sur section 1}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{в.пов сечение 2}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{v.sur section 2}}, ^\circ\text{C}$
Без наружного утеплителя Without external insulation	13	4,26
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,15$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.15$ m	19,15	18,62
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,13$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.13$ m	19,06	18,45
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,12$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.12$ m	18,99	18,33
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,11$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.11$ m	18,92	18,21

го утеплителя в конструкции фасадной системы с двухслойной стеновой панелью. Анализ расчетов по двум методикам показал, что целесообразная толщина наружного утеплителя составляет $\delta_{\text{ут}} = 0,12$ м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При инженерном расчете по определению эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели получено, что выполнение требования $R_0^{\text{нр1}} \geq R_0^{\text{тп}}$ обеспечивается

при минимальной величине толщины слоя наружного утеплителя фасадной системы $\delta_{\text{ут}} = 0,12$ м.

Результаты проведенной серии численных расчетов при различных величинах толщины слоя наружного утеплителя (варианты: без наружного утеплителя; толщина наружного утеплителя 0,15 м; толщина наружного утеплителя 0,13 мм; толщина наружного утеплителя 0,12 м; толщина наружного утеплителя 0,11 м) показали, что снижение толщины наружного утеплителя до 0,12 м достаточно для обеспечения нормируемых параметров темпе-

ратур на внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции (рассматриваемой стеновой панели).

Результатирующую величину толщины утеплителя наружного слоя стеновой панели по результатам инженерно-аналитического и численного расчетов для стеновой панели жилого здания с представленными в работе характеристиками, проектируемого в климатическом районе г. Москвы, рекомендуется принять не менее 0,12 м.

На основании исследования можно сделать следующие выводы:

- фактические величины сопротивления теплопередаче, в том числе распределение температур в толще рассматриваемых конструкций, определены для стационарного режима;
- анализ численного расчета в ПК COMSOL Multiphysics подтверждает результаты, полученные в ходе проведенного инженерно-аналитического расчета;
- теплопроводные включения на участках стеновой панели без вкладышей из минераловатных плит оказывают влияние на снижение температуры на внутренней поверхности стеновых панелей;
- результаты выполненного инженерно-аналитического расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели,

а также численного моделирования в ПК COMSOL Multiphysics позволяют получить уточненную величину сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели и способствуют определению минимальной толщины слоя наружного утеплителя в зависимости от климатического района проектирования и строительства жилого здания;

- применение заполнителей из минераловатных плит в конструкции двухслойных стеновых панелей увеличивает эквивалентное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции;
- приведен пример расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели заданных размеров по предлагаемой в статье методике, позволяющий более точно определить минимальную толщину слоя наружного утеплителя для конкретного климатического региона проектирования и строительства жилого здания;
- предлагаемая методика расчета позволяет существенно снизить затраты на единицу площади стеновой панели при организации утепления фасада жилого здания;
- для подтверждения результатов аналитических расчетов и численных исследований требуется обязательная верификация физической модели объекта исследования в климатической камере специализированной лаборатории.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмина Т.К., Аветисян Р.Т., Мирзаханова А.Т. Особенности строительства зданий из крупногабаритных модулей (часть 1) // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 95–101. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-95-102. EDN RISDVD.
2. Shi Y., Zhang Y., Ni K., Liu W., Luo Y. Research and practices of large composite external wall panels for energy saving prefabricated buildings // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 289. P. 10012. DOI: 10.1051/mateconf/201928910012
3. Chen Z., Jiang L., Xiao M., Hu Y., Huang S. Rapid construction of modular buildings for emergencies: a case study from Hong Kong, China // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Civil Engineering. 2023. Vol. 176. Issue 2. Pp. 65–72. DOI: 10.1680/jcien.22.00172
4. Смолий В.А., Косарев А.С., Яценко Е.А. Эффективность применения энергосберегающих трехслойных панелей для жилых и общественных объектов каркасно-панельного домостроения // Центральный научный вестник. 2018. Т. 3. № 15–16 (56–57). С. 47–50. EDN XYOFLV.
5. Семикин П.В., Должиков В.Н. Эффективные энергосберегающие стеновые панели // Творче-

ство и современность. 2016. № 1 (1). С. 65–76. EDN YURSCX.

6. Khaleghi H., Karatas A. Arctic architectures: unleashing energy efficiency and resilience in extreme cold regions // Proceedings of International Structural Engineering and Construction. 2023. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.14455/ISEC.2023.10(1).SUS-24

7. Матвеев А.В., Овчинников А.А. Разработка энергоэффективных крупнопанельных ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 19–23. EDN STWXOX.

8. Назиров Р.А., Белов Т.В. Влияние сопротивления теплопередаче утеплителя на распределение температурных полей в стеновых ограждениях с навесными вентилируемыми фасадами // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2014. Т. 7. № 2. С. 207–213. EDN SBYPBF.

9. Давидюк А.А. Оценка влияния теплопроводных включений на приведенное сопротивление теплопередаче наружных многослойных стен на основе легких бетонов на стекловидных заполнителях // Жилищное строительство. 2014. № 7. С. 24–27. EDN SHORXZ.

10. Щекин Р.В., Корневский С.М., Бем Г.Е. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга

вторая. Вентиляция и кондиционирование воздуха. 4-е изд., перераб. и доп. Киев : Будівельник, 1976. 416 с.

11. Пастушков П.П., Гагарин В.Г., Павленко Н.В. Методическое пособие по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий. М. : ФАУ «ФЦС», 2019.

12. Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // Строительные материалы. 2019. № 4. С. 57–64. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63. EDN SDSOJK.

13. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Изменение во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 28–31. EDN YUNG SX.

14. Самарин О.Д., Полякова М.З. Зависимость теплотехнической однородности наружных стен жилых зданий от их геометрических характеристик и климатических параметров // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 3 (219). С. 52–54. EDN KJAEYL.

15. Grünbauer H.J.M., Bicerano J., Clavel P., Daussin R.D., de Vos H.A., Elwell M.J. et al. Rigid Polyurethane Foams // Polymeric Foams. 2004. DOI: 10.1201/9780203506141.ch7

16. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Количественная оценка энергоэффективности энергооберегающих мероприятий // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 7–9. EDN QIOMJZ.

17. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions — Properties, requirements and possibilities // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 10. Pp. 2549–2563. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015

18. Малявина Е.Г., Фролова А.А. Влияние климатических особенностей района строительства на экономически выгодный уровень тепловой защиты офисных зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 11 (743). С. 89–99. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-743-11-89-99. EDN LSCNCN.

19. Дацюк Т.А., Гримитлин А.М., Анисимов С.М., Цыганков А.В. Трансмиссионные и инфильтрационные тепловые потери жилых зданий // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 115–120. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-115-120. EDN FAMYON.

20. Xing D., Li N. Three-dimensional heat transfer of globe thermometers in indoor environments controlled by radiant systems // Building and Environment. 2021. Vol. 188. P. 107505. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107505

21. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics энергопотерь сооружений ЖКХ в зависимости от условий эксплуатации // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2019. № 4 (208). С. 74–79. EDN SOJABE.

Поступила в редакцию 7 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2024 г.

Одобрена для публикации 22 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Самвел Володяевич Саргсян — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, директор Научно-образовательного центра «Теплогазоснабжение и вентиляция» (НОЦ «ТГВ»); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru;

Вера Валерьевна Агафонова — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 532445, Scopus: 57204528191, ORCID: 0000-0001-5839-0556; agafonovavv@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Саргсян С.В. — научное руководство, обзор современного состояния вопроса, концепция исследования, разработка программы исследований и ее реализация, написание исходного текста, итоговые выводы.

Агафонова В.В. — обзор современного состояния вопроса, участие в разработке программы исследований и реализация, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuzmina T.K., Avetisyan R.T., Mirzakhanova A.T. Features of the construction of buildings from large-sized modules. *Proceedings of the TSU*. 2022; 5:95-101. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-95-102. EDN RISDVD. (rus.).
2. Shi Y., Zhang Y., Ni K., Liu W., Luo Y. Research and practices of large composite external wall panels for energy saving prefabricated buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 289:10012. DOI: 10.1051/mateconf/201928910012
3. Chen Z., Jiang L., Xiao M., Hu Y., Huang S. Rapid construction of modular buildings for emergencies: a case study from Hong Kong, China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Civil Engineering*. 2023; 176(2):65-72. DOI: 10.1680/jci.22.00172
4. Smoliy V.A., Kosarev A.S., Yatsenko E.A. Efficiency of using energy-saving three-layer panels for residential and public frame-panel housing construction. *Central Scientific Bulletin*. 2018; 3(15-16):(56-57):47-50. EDN XYOFLV. (rus.).
5. Semikin P.V., Dolzhikov V.N. Efficient energy-saving wall panels. *Creativity and Modernity*. 2016; 1(1):65-76. EDN YURSCX. (rus.).
6. Khaleghi H., Karatas A. Arctic architectures: unleashing energy efficiency and resilience in extreme cold regions. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*. 2023; 10(1). DOI: 10.14455/ISEC.2023.10(1).SUS-24
7. Matveev A.V., Ovchinnikov A.A. Development of energy-efficient large-panel enclosing structures. *Housing Construction*. 2014; 10:19-23. EDN STWXOX. (rus.).
8. Nazirov R.A., Belov T.V. Influence resistance heat insulant distribution of temperature fields in wall fences ventilated facades. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014; 7(2):207-213. EDN SBYPBF. (rus.).
9. Davidyuk A.A. Assessment of the influence of heat-conducting inclusions on the reduced heat transfer resistance of external multilayer walls based on lightweight concrete with glassy fillers. *Housing Construction*. 2014; 7:24-27. EDN SHORXZ. (rus.).
10. Shchekin R.V., Korenevsky S.M., Bem G.E. *Handbook of heat supply and ventilation. Book two. Ventilation and air conditioning. 4th ed., revised and additional*. Kyiv, Budivel'nik, 1976; 416. (rus.).
11. Pastushkov P.P., Gagarin V.G., Pavlenko N.V. *Methodological manual for assigning calculated thermal performance indicators of building materials and products*. Moscow, FAU "FCS", 2019. (rus.).
12. Pastushkov P.P. On the problems of determining the thermal conductivity of building materials. *Construction Materials*. 2019; 4:57-64. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63. EDN SDSOJK. (rus.).
13. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Changes in the time of thermal conductivity of gas-filled polymer thermal insulation materials. *Construction Materials*. 2017; 6:28-31. EDN YUNG SX. (rus.).
14. Samarin O.D., Polyakova M.Z. Dependence of thermal uniformity of external walls of residential buildings on their geometric characteristics and climatic parameters. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2020; 3(219):52-54. EDN KJAEYL. (rus.).
15. Grünbauer H.J. M., Bicerano J., Clavel P., Dausin R.D., de Vos H.A., Elwell M.J. et al. Rigid Polyurethane Foams. *Polymeric Foams*. 2004. DOI: 10.1201/9780203506141.ch7
16. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Quantitative assessment of the energy efficiency of energy-saving measures. *Construction Materials*. 2013; 6:7-9. EDN QIOMJZ. (rus.).
17. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions — Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. 2011; 43(10):2549-2563. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015
18. Malyavina E.G., Frolova A.A. The influence climate features of the construction area on the economically favorable level thermal protection in office buildings. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 11(743):89-99. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-743-11-89-99. EDN LSCNCN. (rus.).
19. Datciuk T.A., Grititlin A.M., Anisimov S.M., Tsygankov A.V. Transmission and infiltration heat losses of residential buildings. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 6(89):115-120. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-115-120. EDN FAMYON. (rus.).
20. Xing D., Li N. Three-dimensional heat transfer of globe thermometers in indoor environments controlled by radiant systems. *Building and Environment*. 2021; 188:107505. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107505
21. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. Modeling in COMSOL Multiphysics energy losses of housing and communal services structures depending on operating conditions. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2019; 4(208):74-79. EDN SOJABE. (rus.).

Received January 7, 2024.

Adopted in revised form on January 12, 2024.

Approved for publication on January 22, 2024.

B I O N O T E S: **Samvel V. Sargsyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Director of the Scientific and Educational Center “Heat and Gas Supply and Ventilation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru;

Vera V. Agafonova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 532445, Scopus: 57204528191, ORCID: 0000-0001-5839-0556; agafonovavv@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Samvel V. Sargsyan — scientific guidance, review of the current state of the issue, research concept, development of a research program and its implementation, writing the source text, final conclusions.

Vera V. Agafonova — review of the current state of the issue, participation in the development of the research program and implementation, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.003

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.645-655

Стратегические направления и предпосылки развития интегрированных структур инвестиционно-строительной деятельности

Сергей Игоревич Беляков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях высокой динамики изменений внешней среды ключевой проблематикой управления интегрированными структурами инвестиционно-строительной деятельности (ИСД) является выработка эффективных решений в области стратегического развития и долгосрочной оптимизации. В рамках исследования данной актуальной проблематики целесообразно рассмотрение направлений стратегического развития интегрированных структур на основе применения сценарно-факторного анализа.

Материалы и методы. Экономическое моделирование целевой функции стратегического развития интегрированной структуры ИСД, формализуемой в различных показателях в зависимости от стратегических приоритетов и бизнес-модели организации, выполняется на основе использования инструментария факторного и регрессионного анализа на базе экспертных оценок и репрезентативной статистической выборки за прошедшие периоды на базе данных о практике функционирования крупных интегрированных структур ИСД.

Результаты. Основные результаты исследования включают систематизацию альтернативных подходов к повышению эффективности функционирования интегрированных структур ИСД, применяемых в рамках разработки и реализации задач стратегического управления их развитием, авторскую классификацию факторного пространства стратегического развития интегрированных структур ИСД и сценариев развития инвестиционно-строительных объединений предприятий на основе системы критериев и соответствующих им типовых ситуаций, формализованную функциональную модель целевого показателя уровня стратегического развития интегрированной структуры ИСД.

Выводы. Результаты проведенного сценарно-факторного анализа и разработки целевой функциональной модели формируют научно-методическую основу и предпосылки для разработки и использования подходов к моделированию стратегического развития интегрированных структур ИСД. Дальнейшее научное исследование в рассматриваемой предметной области может выполняться по целому ряду направлений, приоритетным из которых представляется разработка и обоснование методологических подходов и инструментария формирования производственных программ стратегического развития на основе синхронизации инвестиционного и производственного потенциалов в рамках бизнес-моделей ИСД.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инвестиционно-строительная деятельность, интегрированные структуры, экономическое моделирование, эффективность, стратегическое управление, сценарный анализ, факторный анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Беляков С.И. Стратегические направления и предпосылки развития интегрированных структур инвестиционно-строительной деятельности // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 645–655. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.645-655

Автор, ответственный за переписку: Сергей Игоревич Беляков, BelyakovSI@mgsu.ru.

Strategic directions and prerequisites for the development of integrated structures in investment and construction activities

Sergei I. Belyakov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In conditions of high dynamics of changes in the external environment, the key problem of managing integrated structures of investment and construction activities is the development of effective solutions in the field of strategic

development and long-term optimization. Within the framework of the study of this topical issue, it is advisable to consider the directions of strategic development of integrated structures on the basis of scenario-factor analysis.

Materials and methods. Economic modeling of the target function of the strategic development of the integrated structure of investment and construction activities, formalized in various indicators depending on strategic priorities and business model of the organization, is carried out on the basis of application of tools of factor and regression analysis based on expert assessments and a representative statistical sample over the past periods based on data on the practice of functioning of large integrated structures of investment and construction activities.

Results. Main results of the research include the systematization of alternative approaches to improving the efficiency of integrated structures of investment and construction activities used in the development and implementation of strategic management tasks for their development, the author's classification of the factor space of strategic development of integrated structures of investment and construction activities and development scenarios of investment and construction associations based on a system of criteria and their corresponding typical situations, a formalized functional model of the target indicator of the level of strategic development of the integrated structure of investment and construction activities.

Conclusions. The results of the scenario-factor analysis and the development of the target functional model form the scientific and methodological basis and prerequisites for the development and application of approaches to modelling the strategic development of integrated structures of investment and construction activities. Further scientific research in the subject area under consideration can be carried out in a number of areas, the priority of which the author presents the development and justification of methodological approaches and tools for the formation of production programmes for strategic development based on the synchronization of investment and production potentials within the framework of business models of investment and construction activities.

KEYWORDS: investment and construction activities, integrated structures, economic modelling, efficiency, strategic management, scenario analysis, factor analysis

FOR CITATION: Belyakov S.I. Strategic directions and prerequisites for the development of integrated structures in investment and construction activities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):645-655. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.645-655 (rus.).

Corresponding author: Sergei I. Belyakov, BelyakovSI@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Инвестиционно-строительная деятельность (ИСД) как специфическая сфера бизнеса может реализовываться в широком диапазоне форм на основе различных подходов к структурированию и организации процессов взаимодействия ее субъектов [1–4]. Практика показывает, что в определенных ключевых сферах технологически и экономически выгодно существование интегрированных структур, которые концентрировали бы значительные объемы финансовых, материальных и человеческих ресурсов. Специалисты в полной мере относят к таким сферам и ИСД.

Многолетняя практика функционирования предприятий инвестиционно-строительного комплекса показывает, что интеграция предприятий и развитие интегрированных моделей деятельности является эффективным способом функционирования в условиях нестабильности факторов внешней и внутренней среды за счет концентрации ресурсов и снижения зависимости от внешних источников финансирования, а также обеспечения более эффективного финансового контроля [5]. Кроме того, такие структуры позволяют сократить издержки производства и повысить эффективность бизнес-процессов.

Интегрированные структуры обладают широким набором свойств, которые учитываются не только при определении основных признаков (акционерный капитал, масштаб), но и при оценке значимости других факторов. Это разнообразие форм и свойств объясняется не только коллективной формой бизнеса и возможностью сохранения устойчивости к рискам, но и национальными особенностями и характером формирования их эволюции [6, 7].

В российской строительной отрасли типичной распространенной формой деятельности интегрированных структур в настоящее время, прежде всего, являются инвестиционно-строительные холдинги, объединяющие на основе горизонтального и вертикального комбинирования различные функциональные элементы в рамках интегрированной структуры, реализующей, как правило, проектный подход к ИСД. Горизонтальный аспект комбинирования при этом обеспечивает объединение хозяйственных единиц на основе их специализированной направленности в целях обеспечения полноты и непрерывности производственно-технологических циклов. Вертикальное комбинирование обеспечивает формирование и функционирование организационно-управленческих структур инвестиционно-производственной деятельности в рамках объединения предприятий. Варианты развития таких холдинговых структур могут быть разнообразными, и выбор определенного сценария во многом определяется стратегическими целями компании [8, 9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В современных условиях высокой динамики изменений внешней среды ключевой проблемой управления интегрированными структурами ИСД является выработка эффективных решений в области стратегического развития и долгосрочной оптимизации.

Целевая функция стратегического развития интегрированной структуры ИСД может быть представлена в различных видах в зависимости от стратегических приоритетов и бизнес-модели организации и формулируется на основе конкретных пока-

зателей, которые организация стремится улучшить или достичь в своем развитии [10–13].

Варианты целевых установок, которые могут быть положены в основу при формировании стратегий развития интегрированных структур (холдинга), могут включать:

- максимизацию прибыли: целевая функция стратегического развития может быть ориентирована на максимизацию чистой прибыли холдинга;
- рост выручки: холдинг может стремиться увеличить общую выручку за счет развития новых проектов и масштабирования;
- увеличение рыночной доли: цель может состоять в том, чтобы увеличить долю холдинга на целевом рынке строительной продукции;
- расширение географии деятельности: целевая функция может включать расширение деятельности, охватывающее новые территории, регионы или страны;
- сокращение экологического следа: холдинг может ставить перед собой задачу снижения негативного воздействия на окружающую среду;
- повышение эффективности проектов: цель может состоять в оптимизации бизнес-процессов и снижении издержек;
- увеличение стоимости активов: холдинг может стремиться повысить стоимость своего инвестиционного портфеля активов;
- повышение степени удовлетворенности потребителей: целью может быть повышение уровня удовлетворенности потребителей в рамках целевых сегментов рынка строительной продукции;
- развитие инноваций: холдинг может ставить перед собой задачу разработки и внедрения инновационных технологий и решений, повышения доли инновационных процессов либо продуктов.

В наиболее общем виде альтернативные подходы к повышению эффективности функционирования интегрированных структур ИСД, применяемые в рамках разработки и реализации задач стратегического управления их развитием, можно представить в следующем виде (табл.).

Выбор оптимального подхода либо оптимального сочетания подходов к повышению эффективности функционирования интегрированных структур ИСД оказывает существенное влияние на формирование приоритетов развития компании и является одним из существенных элементов механизма ее стратегического развития, включающего следующие базовые этапы и процедуры [14, 15]:

- 1) анализ текущего состояния отрасли, целевых сегментов рынка и перспектив их развития;
- 2) определение приоритетных целей и задач стратегического развития компании;
- 3) разработка стратегии развития;
- 4) выбор инструментов реализации стратегии;
- 5) оценка результативности стратегии;
- 6) мониторинг и контроль выполнения стратегии.

Базовым основополагающим элементом стратегического анализа является исследование факторного пространства, оказывающего определяющее влияние на стратегическое развитие интегрированных структур ИСД на различных временных периодах прогнозирования [1, 2, 16–19].

На рис. 1 представлена авторская классификация факторного пространства, включающего традиционное выделение внутренних и внешних факторов стратегического развития интегрированных структур ИСД.

Элементы представленного факторного пространства в многообразии возможных сочетаний формируют сценарные предпосылки стратегического развития субъектов ИСД.

На основе анализа теоретических подходов к формированию программ стратегического развития и практики их реализации успешными компаниями можно выявить широкий перечень альтернативных путей формирования и развития объединений предприятий в ИСД [1–3, 6, 20–25], применимых в зависимости от декларируемых целей стратегического развития и условий функционирования, в том числе:

- органический рост: интегрированная структура может развиваться путем органического роста, то есть постепенного расширения деятельности и бизнеса, при этом компания может постепенно увеличивать объемы проектов и инвестиций, привлекать новых клиентов и осваивать новые рынки;
- формирование совместных предприятий: интегрированная структура может создавать совместные предприятия с другими компаниями для реализации совместных проектов или для выхода на новые рынки, что позволяет совместно использовать ресурсные потенциалы и компетенции;
- приобретения и слияния: компания может формировать объединение путем приобретения или слияния с другими компаниями в отрасли, что может быть эффективным для расширения географического присутствия, диверсификации услуг или развития технологий;
- франчайзинг и лицензирование: компания может использовать модель франчайзинга или лицензирования для распространения своих брендов и бизнес-моделей на другие территории, регионы или страны, что позволяет обеспечить ускоренную динамику развития;
- венчурное инвестирование: компания может инвестировать в инновационные компании или стартапы, которые имеют потенциал для инноваций и роста в инвестиционно-строительной сфере, такие партнерства могут обеспечить доступ к инновационным решениям и технологиям;
- развитие холдинговой структуры: компания может формировать и развивать холдинговую структуру, объединяющую несколько компаний в объединении, что позволяет координировать де-

Альтернативные подходы к повышению эффективности функционирования интегрированных структур инвестиционно-строительной деятельности

Alternative approaches to improving the efficiency of integrated structures of investment and construction activities

Подходы к повышению эффективности интегрированных структур Approaches to improving the efficiency of integrated structures	Ключевые аспекты стратегии развития Key aspects of the development strategy	Целевой вектор Target vector
Стоимостной подход Value approach	Увеличение масштаба производства. Налоговая экономия. Увеличение фондов. Синергетический эффект взаимодействия. Операционная экономия. Диверсификация и снижение рисков Increasing the scale of production. Tax savings. An increase in funds. The synergistic effect of interaction. Operational savings. Diversification and risk reduction	Увеличение стоимости компании и отдельных стратегических активов Increasing the value of the company and individual strategic assets
Конкурентный подход Competitive approach	Повышение потребительского качества продукции. Снижение цены. Повышение инновационного потенциала. Рост производственных и сбытовых мощностей. Формирование долгосрочных планов управления качеством и конкурентоспособностью Improving the consumer quality of products. Price reduction. Increasing the innovation potential. The growth of production and sales capacities. Formation of long-term quality and competitiveness management plans	Увеличение доли целевых рынков Increasing the share of target markets
Затратный подход Cost approach	Снижение транзакционных издержек. Снижение удельных накладных расходов. Снижение управленческих затрат. Снижение удельных затрат на формирование и развитие корпоративной инфраструктуры Reduction of transaction costs. Reduction of unit overhead costs. Reduction of management costs. Reduction of unit costs for the formation and development of corporate infrastructure	Снижение капитальных и операционных затрат Reduction of capital and operating costs
Кооперационный подход Cooperative approach	Снижение издержек на взаимные поставки. Формирование общей сбытовой сети. Интенсификация ресурсного обмена (финансы, кадры, информация, компетенции и т.п.). Повышение возможностей привлечения заемного финансирования. Повышение устойчивости за счет формирования долгосрочных корпоративных стратегий Reducing the cost of mutual supplies. Formation of a common sales network. Intensification of resource exchange (finance, personnel, information, competencies, etc.). Increasing the possibilities of attracting debt financing. Increasing sustainability through the formation of long-term corporate strategies	Обеспечение долгосрочных преимуществ от устойчивой кооперации Ensuring long-term benefits from sustainable cooperation

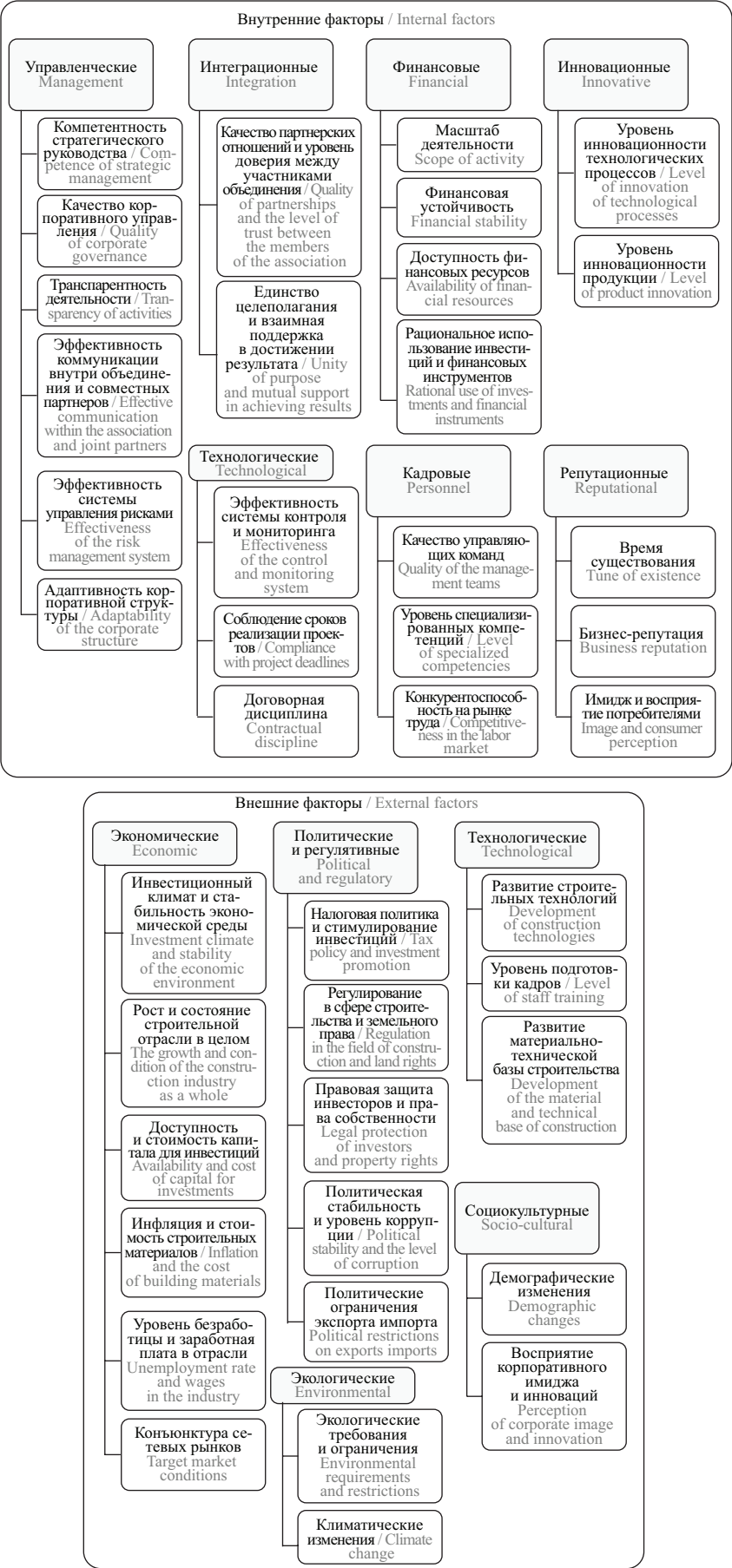


Рис. 1. Факторы стратегического развития интегрированных структур инвестиционно-строительной деятельности

Fig. 1. Factors of strategic development of integrated structures of investment and construction activities

тельность различных компаний и эффективно управлять ресурсами;

• диверсификация продуктов и услуг: компания может развивать свою деятельность на основе диверсификации портфеля продуктов и услуг, что может способствовать как повышению эффективности, так и обеспечению необходимого уровня устойчивости по отношению к рискам.

Выбор конкретного пути зависит от целей и стратегии компании, рисков и возможностей на рынке, а также от показателей совокупного ресурсного потенциала компании. Часто компании комбинируют несколько из этих подходов, чтобы достичь наилучших результатов в формировании и развитии интегрированных структур в ИСД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимым условием научного моделирования закономерностей развития интегрированных

структур является систематизация и разработка типологии стратегических альтернатив развития по ряду характерных признаков.

В целях решения данной задачи было проведено аналитическое исследование, в результате которого многообразие форм и направлений стратегического развития представлено в виде универсальной типологии по трем ключевым критериям:

- 1. Базовый критерий — источник роста.
- 2. Вторичный критерий — уровень интеграции.
- 3. Третичный критерий — географическая экспансия.

Можно представить классификацию сценариев развития инвестиционно-строительных объединений на основе системы критериев и соответствующих им типовых ситуаций, представленных на рис. 2.

Наиболее сложную исследовательскую задачу представляет моделирование взаимосвязей между элементами факторного пространства стратегическо-

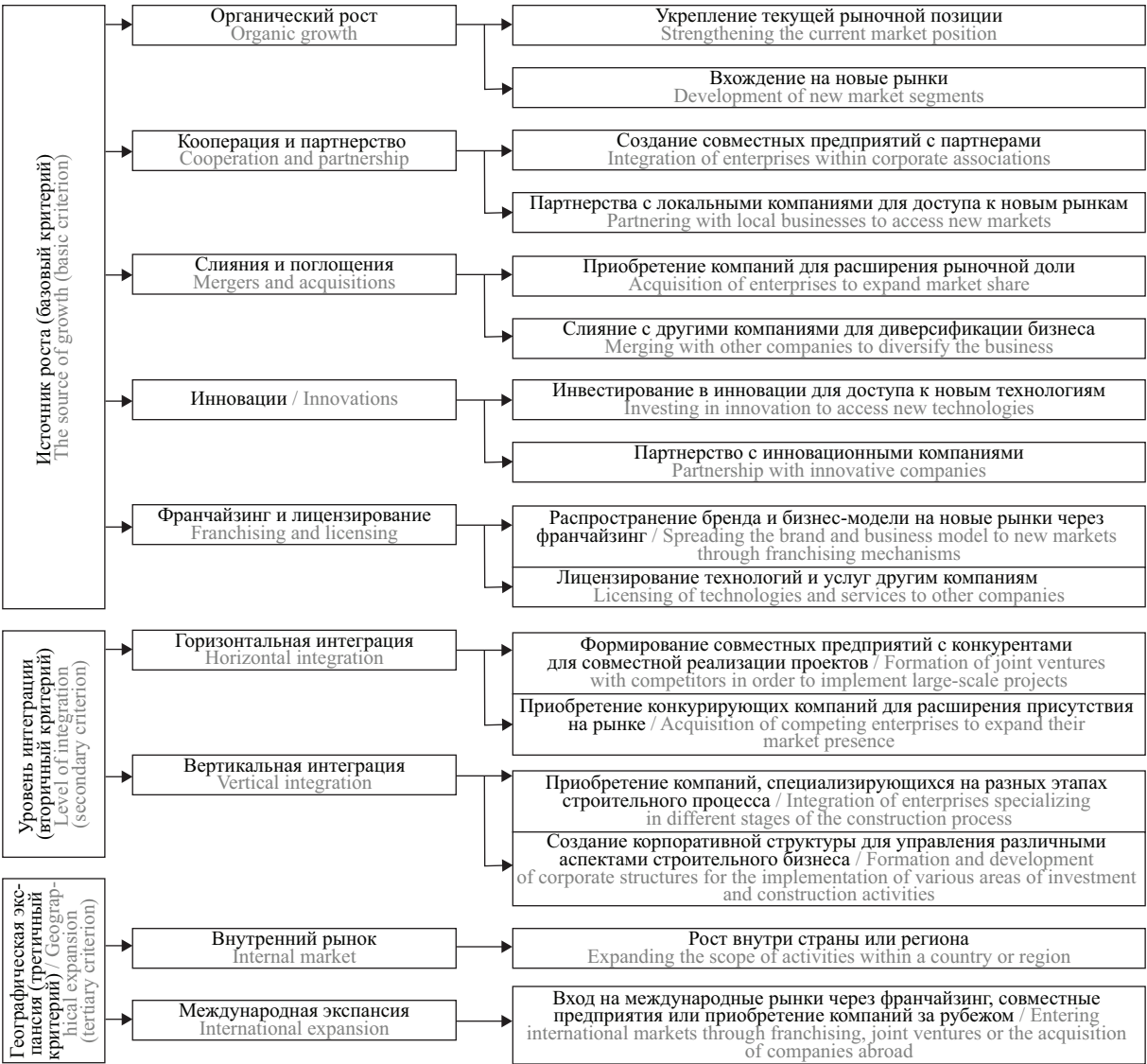


Рис. 2. Типология альтернатив стратегического развития

Fig. 2. Typology of strategic development alternatives

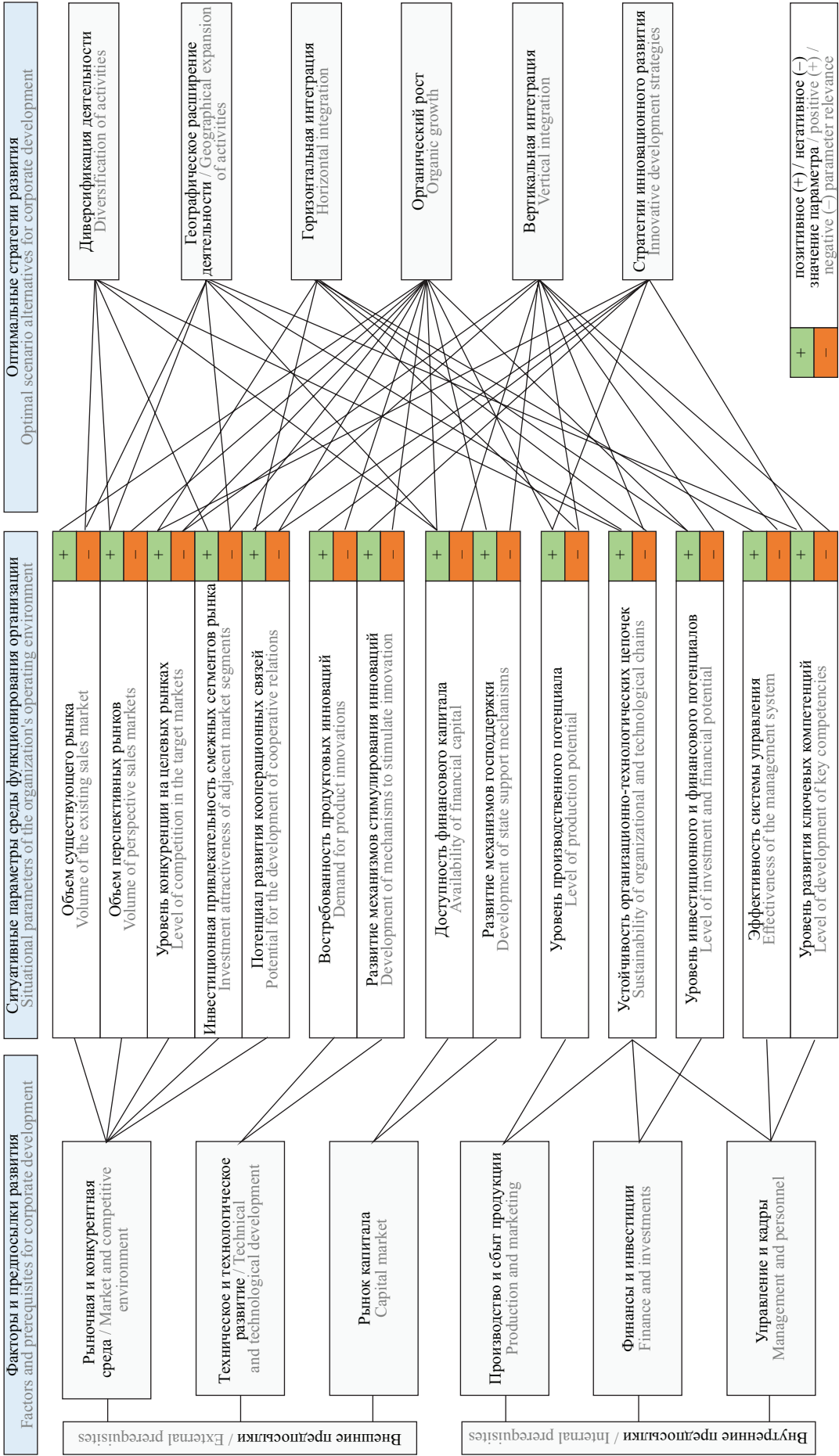


Рис. 3. Результаты сценарного моделирования
Fig. 3. Scenario modelling results

го развития и соответствующими им оптимальными направлениями развития интегрированных структур.

В целях решения этой задачи автором был применен инструментарий факторного и регрессионного анализа на основе экспертных оценок и репрезентативной статистической выборки за прошедший период на основе данных о практике функционирования крупных интегрированных структур ИСД.

В качестве промежуточного структурирующего элемента сценарной модели были применены выделенные ситуационные параметры, характеризующие внутреннюю и внешнюю среды функционирования организации. В качестве условного элемента ситуационной модели, соответственно, рассматривались результаты бинарной оценки данных параметров.

Результаты сценарного моделирования представлены на рис. 3.

Применение результатов сценарного моделирования требует формализации целевого экономического показателя — уровня стратегического развития интегрированной структуры ИСД, который может быть представлен в виде следующей функциональной модели:

$$S_{dev}(t) = f[S(UA_t), R(P_{pr}P_{inv}P_j), R_{coop}, D_{str}, F_{org}, E_m],$$

где S_{dev} — уровень стратегического развития интегрированной структуры ИСД; t — время; $S(UA_t)$ — текущее сочетание фаз макроэкономических циклов, жизненных циклов развития отраслевого рынка; $R(P_{pr}P_{inv}P_j)$ — текущее значение резервов конкурентоспособности в зависимости от сочетания соответствующих потенциалов: производственного, инвестиционного и финансового; R_{coop} — текущее значение резервов кооперации за счет развития различных форм горизонтальной и вертикальной интеграции; D_{str} — выбор рациональной стратегии развития; F_{org} — выбор рациональных организаци-

онных моделей функционирования; E_m — эффективность системы управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимо отметить, что процесс функционирования интегрированных структур ИСД не является строго формализуемым, тем более не представляется возможным формальное описание в явном виде оценки его текущего экономического состояния и тенденций развития в целях выбора рациональных вариантов стратегии управления предпринимательской деятельностью и осуществления инвестиционной политики.

Очевидно, что выбор оптимальных направлений стратегического развития определяется, прежде всего, целями компании, уровнем рисков и возможностей на рынке, а также внутренним конкурентным потенциалом интегрированной структуры. Причем на практике в существенной доле случаев компании комбинируют несколько направлений развития, чтобы достичь наилучших стратегических результатов.

Результаты проведенного сценарно-факторного анализа и разработки целевой функциональной модели формируют научно-методическую основу и предпосылки для разработки подходов к моделированию стратегического развития интегрированных структур ИСД.

Дальнейшее научное исследование в рассматриваемой предметной области может выполняться по целому ряду направлений, приоритетным из которых автор представляет разработку и обоснование методологических подходов и инструментария формирования производственных программ стратегического развития на основе синхронизации инвестиционного и производственного потенциалов в рамках бизнес-моделей инвестиционно-строительной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Benuzh A.A., Bolotin S.A., Dadar A.H., Budanov I.V., Butyrin A.Yu., Doan Z.H. et al. Construction management and real estate development. Part I: Construction management. 4th ed. rev. and exp. / under the general scientific editorship of Professor P.G. Grabovyy. Stockholm : ASV Publ., 2020. 672 p.
2. Avilova I.P., Naumov A.E., Thuong Le.V., Belyakov S.I., Bolotin S.A., Butyrin A.Yu. et al. Construction management and real estate development. Part II: Real estate development. 4th ed. rev. and exp. / under the general scientific editorship of Professor P.G. Grabovyy. Stockholm : ASV Publ., 2020. 608 p.
3. Асаул А.Н., Павлов В.И., Бескиерь Ф.И., Мышко О.А. Менеджмент корпорации и корпоративное управление. СПб. : Гуманистика, 2006. 328 с.
4. Асаул А.Н., Батрак А.В. Корпоративные структуры в региональном инвестиционно-стро-

ительном комплексе. М. : Изд-во АСВ; СПб. : СПбГАСУ, 2001. 168 с.

5. Веснин В.Р., Кафидов В.В. Корпоративное управление. М. : ИНФРА-М, 2017. 272 с.

6. Комарова А.В. Развитие строительной отрасли на современном этапе // Экономика нового мира. 2020. Т. 5. № 3 (18). С. 28–38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45666330>

7. Белоусов А.В. Корпоративные формы организации предпринимательской деятельности: особенности, преимущества, недостатки // Государственный советник. 2016. № 1 (13). С. 33–40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26179419>

8. Герасина Ю.А. Формирование механизма корпоративного структурирования в российской экономике : дис. ... канд. экон. наук. М., 2009. 154 с.

9. Желиховский Д.О., Беляков С.И. Methodological approaches to the formation of flexible management structures for construction groups // Недвижимость: экономика, управление. 2023. № 1. С. 39–43. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/115/137>

10. Сарченко В.И., Хиревич С.А., Сарченко М.В. Problems of ensuring the competitiveness of investment and construction activities under new macroeconomic conditions and approaches to their resolution // Недвижимость: экономика, управление. 2022. № 1. С. 82–87. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/70/212>

11. Воронова Е.К. Управление результативно-стью деятельности организации на основе методологии менеджмента качества : автореф. дис. ... канд. экон. наук. Саранск, 2014. 23 с.

12. Беляков С.И. Main approaches to the assessment of the efficiency of corporate integration of enterprises in investment and construction complex // Недвижимость: экономика, управление. 2023. № 3. С. 32–36. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/145/264>

13. Грабовый К.П. Научные подходы повышения эффективности организации строительного бизнеса в рамках корпоративного управления // Недвижимость: экономика, управление. 2009. № 2. С. 40–44.

14. Власенко В.А. Обоснование концептуальных основ формирования инновационных стратегий на микро- и мезоуровне // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2018. Т. 15. № 8. С. 71–76.

15. Галеева Ю.А. Механизм создания интегрированных корпоративных структур в строительном комплексе // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2007. № 1 (51). С. 25–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanizm-sozdaniya-integrirovannyh-korporativnyh-struktur-v-stroitelnom-komplekse>

16. Сервейинг. Организация, экспертиза, управление. Часть 1. Организационно-технологический модуль системы сервейинга. М. : Московский государственный строительный университет; Изд-во АСВ, 2016. 272 с.

17. Сервейинг. Организация, экспертиза, управление. Часть 2. Экспертиза недвижимости и строительный контроль в системе сервейинга. М. : Мо-

сковский государственный строительный университет; Изд-во АСВ, 2016. 424 с.

18. Байрамуков С.Х., Долаева З.Н., Урусов А.Р. Повышение конкурентоспособности строительной организации с учетом основных и специфических факторов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-konkurentosposobnosti-stroitelnoy-organizatsii-s-uchetom-osnovnyh-i-spetsificheskikh-faktorov>

19. Thomas A.V., Sudhakumar J. Factors influencing construction labour productivity: An Indian case study // Journal of Construction in Developing Countries. 2015. Vol. 20. Pp. 53–68.

20. Портер М. Конкурентное преимущество. Как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость. М. : Альпина Паблишер, 2008. 714 с.

21. Коломыцев Д.А. Основные параметры конкурентоспособности современных строительных предприятий России // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 24 (106). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-parametry-konkurentosposobnosti-sovremennyh-stroitelnyh-predpriyatiy-rossii>

22. Atkinson R. Project management: Cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria // International Journal of Project Management. 1999. Vol. 17. Issue 6. Pp. 337–342. DOI: 10.1016/S0263-7863(98)00069-6

23. Yuchtman E., Seashore S. A system resource approach to organizational effectiveness // American Sociological Review. 1967. Vol. 32. Issue 6. Pp. 891–903. DOI: 10.2307/2092843

24. Шевченко А.П. Современные подходы к структурированию строительных организаций в зависимости от позиционирования на рынке // Экономика и управление. 2014. № 1 (110). URL: https://ecsn.ru/wp-content/uploads/201401_78.pdf

25. Коготкова И.З., Сальник А.А. Особенности стратегического управления организациями строительной сферы экономики // Вестник ГУУ. 2017. № 3. С. 16–21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-strategicheskogo-upravleniya-organizatsiyami-stroitelnoy-sfery-ekonomiki>

Поступила в редакцию 27 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2024 г.

Одобрена для публикации 24 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Сергей Игоревич Беляков** — кандидат экономических наук, доцент кафедры организации строительства и управления недвижимостью; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 587836, Scopus: 39763951700, ORCID: 0000-0001-5179-737X; BelyakovSI@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Benuzh A.A., Bolotin S.A., Dadar A.H., Budanov I.V., Butyrin A.Yu., Doan Z.H. et al. *Construction management and real estate development. Part I: Construction management*. 4th ed. rev. and exp. P.G. Grabovyy (ed.). Stockholm, ASV Publ., 2020; 672.
2. Avilova I.P., Naumov A.E., Thuong Le.V., Belyakov S.I., Bolotin S.A., Butyrin A.Yu. et al. *Construction management and real estate development. Part II: Real estate development*. 4th ed. rev. and exp. P.G. Grabovyy (ed.). Stockholm, ASV Publ., 2020; 608.
3. Asaul A.N., Pavlov V.I., Beskier F.I., Myshko O.A. *Corporate management and corporate governance*. Saint Petersburg, Humanistics Publ., 2006; 328. (rus.).
4. Asaul A.N., Batrak A.V. *Corporate structures in the regional investment and construction complex*. Moscow, ASV Publishing House; Saint Petersburg, SPbGASU, 2001; 168. (rus.).
5. Vesnin V.R., Kafidov V.V. *Corporate governance*. Moscow, INFRA-M Publ., 2017; 272. (rus.).
6. Komarova A.V. Development of the construction industry at the current stage. *Economics of the New World*. 2020; 5(3):28-38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45666330> (rus.).
7. Belousov A.V. The corporate form of business organization: features, advantages, disadvantages. *State Councilor*. 2016; 1(13):33-40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26179419> (rus.).
8. Gerasina Yu.A. *Formation of the mechanism of corporate structuring in the Russian economy : dissertation of the Candidate of Economic Sciences*. Moscow, 2009; 154. (rus.).
9. Zhelikhovskiy D.O., Belyakov S.I. Methodological approaches to the formation of flexible structures for managing construction groups. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; 1:39-43. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/115/137>
10. Sarchenko V.I., Khirevich S.A., Sarchenko M.V. Problems of ensuring the competitiveness of investment and construction activities under new macroeconomic conditions and approaches to their resolution. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 1: 82-87. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/70/212>
11. Voronova E.K. *Performance management of the organization based on the methodology of quality management : abstract of the dissertation of the Candidate of Economic Sciences*. Saransk, 2014. 23; (rus.).
12. Belyakov S.I. Main approaches to the assessment of the efficiency of corporate integration of enterprises in investment and construction complex. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; 3:32-36. URL: <https://n-eu.iasv.ru/index.php/neu/article/view/145/264>
13. Grabovyy K.P. Scientific approaches of effective organization of building business within the limits of corporate managements. *Real Estate: Economics, Management*. 2009; 2:40-44. (rus.).
14. Vlasenko V.A. Justification of the conceptual bases of formation of innovative strategies in the micro- and mesolevel. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2018; 15(8):71-76. (rus.).
15. Galeeva Yu.A. A mechanism of creation of the integrated corporate structures is in a build complex. *Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy (Baikal State University of Economics and Law)*. 2007; 1(51):25-28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-sozdaniya-integrirovannyh-korporativnyh-struktur-v-stroitelnom-komplekse> (rus.).
16. *Surveying. Organization, expertise, management. Part 1. Organizational and technological module of the maintenance system*. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, ASV Publ., 2016; 272. (rus.).
17. *Surveying. Organization, expertise, management. Part 2. Real estate expertise and construction control in the maintenance system*. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, ASV Publ., 2016; 424. (rus.).
18. Bayramukov S.H., Dolaeva Z.N., Urusov A.R. Increasing the competitiveness of the construction company, taking into account the main and specific factors. *Engineering journal of Don*. 2018; 4(51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-konkurentosposobnosti-stroitelnoy-organizatsii-s-uchetom-osnovnyh-i-spetsificheskikh-faktorov> (rus.).
19. Thomas A.V., Sudhakumar J. Factors influencing construction labour productivity: An Indian case study. *Journal of Construction in Developing Countries*. 2015; 20:53-68.
20. Porter M. *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance*. Simon and Schuster, 2008; 592.
21. Kolomytsev D.A. The main parameters of competitiveness of modern construction companies of Russia. *Modern Problems of Science and Education. Surgery*. 2017; 24(106). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-parametry-konkurentosposobnosti-sovremennyh-stroitelnyh-predpriyatiy-rossii> (rus.).
22. Atkinson R. Project management: Cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*. 1999; 17(6):337-342. DOI: 10.1016/S0263-7863(98)00069-6
23. Yuchtman E., Seashore S. A system resource approach to organizational effectiveness. *American Sociological Review*. 1967; 32(6):891-903. DOI: 10.2307/2092843
24. Shevchenko A.P. Modern approaches to structuring construction organizations depending on market posi-

tioning. *Economics and management*. 2014; 1(110). URL: https://ecsn.ru/wp-content/uploads/201401_78.pdf (rus.).

25. Kogotkova I.Z., Salnik A.A. Features of strategic management organizations construction sector

of the economy. *Bulletin of GUU*. 2017; 3:16-21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-strategicheskogo-upravleniya-organizatsiyami-stroitelnoy-sfery-ekonomiki> (rus.).

Received December 27, 2023.

Adopted in revised form on January 19, 2024.

Approved for publication on February 24, 2024.

B I O N O T E S: **Sergei I. Beliakov** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Organization and Real Estate Management; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 587836, Scopus: 39763951700, ORCID: 0000-0001-5179-737X; BelyakovSI@mgsu.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).
2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).
2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

КБК000000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

Ф.И.О.плательщика

Адресплательщика

Суммаплатыза

Суммаплатежа3822руб.00коп.услугируб.коп.

Итогоруб.коп.«»20г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подписьплательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

КБК000000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

Ф.И.О.плательщика

Адресплательщика

Суммаплатыза

Суммаплатежа3822руб.00коп.услугируб.коп.

Итогоруб.коп.«»20г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подписьплательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК004525988

КБК

000000000000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

03214643000000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК004525988

КБК

000000000000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

