

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 2
2025**

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

Сквозной номер 195

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 2
2025**

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 ПИ № 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	27.02.2025.
Подписан в свет	28.02.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,08. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 68

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 Вичан, 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., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, 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

Инесса 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., академик 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., проф. 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

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:	27.02.2025

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2025

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

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

А.М. Дубино, М.В. Перькова

Формирование природно-экологического каркаса г. Белгорода 167

А.И. Гиясов, О.Н. Сокольская

Модель «острова тепла» урбанизированных территорий и его трансформация 180

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

Я.А. Олехнович, А.Е. Радаев

**Обоснование комбинации стандартных значений характеристик материалов слоев в составе
ограждающей конструкции на основе квадратичной оптимизации 193**

А.Е. Донцова, О.Н. Столяров

Прочность и деформативность складчатых элементов из текстильно-армированного бетона 215

В.А. Пшеничкина, С.Ю. Иванов, С.С. Рекунов, А.А. Чураков

**Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический
отклик системы 231**

С.Г. Саиян, А.В. Васильев

**Численное моделирование динамического отклика башни «Эволюция» при ветровом воздействии
с учетом застройки и разрешением турбулентности 246**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Д.Д. Нецвет, М.Н. Сивальнева, В.В. Нелюбова, В.В. Строкова

Комплексная модификация пенобетона неавтоклавного твердения 280

Н.М. Толыпина, Ш.М. Рахимбаев, Д.Ю. Чашин

Термическая стойкость цементных систем с активными минеральными добавками 291

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

О.В. Ашихмин, А.П. Шестакова

Эффективность применения башенных кранов при строительстве малоэтажных зданий 306

В.В. Глазкова, Н.А. Верстин

Концептуальный подход к управлению инновационным развитием сферы теплоснабжения 317

Требования к оформлению научной статьи 329

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Anastasia M. Dubino, Margarita V. Perkova

Formation of the ecological framework of Belgorod 167

Adham I. Giyazov, Oksana N. Sokolskaya

The model of “heat island” of urbanized territories and its transformation 180

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

Yanis A. Olekhovich, Anton E. Radaev

**Justification of the combination of standard values of material characteristics of layers in the building
envelope on the basis of quadratic optimization 193**

Anna E. Dontsova, Oleg N. Stolyarov

Strength and deformability of folded elements made of textile-reinforced concrete 215

Valeria A. Pshenichkina, Stanislav Yu. Ivanov, Sergey S. Rekunov, Alexey A. Churakov

**Influence of the stiffness ratio of the building and the multilayer soil foundation on the seismic response
of the system 231**

Sergey G. Saiyan, Artemiy V. Vasiliev

**Numerical Simulation of the Dynamic Response of the “Evolution” Tower under Wind Action Considering
Surrounding Buildings and Turbulence Resolution 246**

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Daria D. Netsvet, Mariana N. Sivalneva, Victoria V. Nelyubova, Valeria V. Strokova

Complex modification of non-autoclaved foam concrete 280

Natalia M. Tolypina, Shark M. Rakhimbaev, Dmitriy Yu. Chashin

Thermal stability of cement systems with active mineral additives 291

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Oleg V. Ashihmin, Alena P. Shestakova

Efficiency of tower cranes in the construction of low-rise buildings 306

Valeriya V. Glazkova, Nikolai A. Verstin

A conceptual approach to the management of the innovative development of the heat supply sector 317

Requirements for research paper design 329

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).

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 712.1:712.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.167-179

Формирование природно-экологического каркаса г. Белгорода

Анастасия Михайловна Дубино¹, Маргарита Викторовна Перькова²

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время обостряются противоречия между интенсификацией антропогенной деятельности и необходимостью сохранения и укрепления природных комплексов. Стремительный рост городского населения, глобальная проблема изменения климата во всем мире, высокий уровень антропогенного влияния на естественные ландшафты требуют от современных городов внедрения стратегий устойчивого развития территорий в целом и совершенствования приемов по укреплению природно-экологического каркаса (ПЭК), в частности. Цель исследования — выявление региональных особенностей и проблем формирования ПЭК г. Белгорода и разработка рекомендаций по обеспечению устойчивой высокоурбанизированной среды крупного города.

Материалы и методы. Исследование основано на применении экологического и комплексного подхода к проектированию городской среды, аналитический обзор документов территориального планирования и градостроительного зонирования, проблемный анализ текущего состояния ПЭК г. Белгорода, SWOT-анализ природного ресурсного потенциала территории, аналоговое моделирование.

Результаты. Выявлены региональные особенности и проблемы формирования ПЭК Белгорода. Проведен SWOT-анализ природного ресурсного потенциала территории. Определены слабые и сильные стороны, возможности и угрозы. Предложены основные принципы формирования ПЭК г. Белгорода: принцип непрерывности озелененных территорий, децентрализации зеленых зон, оптимальности антропогенной нагрузки, водосберегающего проектирования, интеграции овражно-балочных комплексов в ПЭК, регенерации ландшафтов приречных территорий, рекультивации отработанных карьеров и их интеграции в ПЭК.

Выводы. Обоснована необходимость дополнения материалов генерального плана развития городского округа «город Белгород» до 2025 г. в части разработки схемы ПЭК. Разработана концептуальная пространственная модель с целью укрепления ПЭК г. Белгорода. Для обеспечения комплексной работы по укреплению ПЭК города предложен ряд рекомендаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: крупный город, устойчивое развитие, природно-экологический каркас, принципы, природный каркас

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дубино А.М., Перькова М.В. Формирование природно-экологического каркаса г. Белгорода // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 167–179. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.167-179

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Михайловна Дубино, anastuzi@gmail.com.

Formation of the ecological framework of Belgorod

Anastasia M. Dubino¹, Margarita V. Perkova²

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU); Belgorod, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The contradictions between the intensification of anthropogenic activities and the need to preserve and strengthen natural complexes are becoming more acute. The rapid growth of the urban population, the global problem of climate change worldwide, and the high level of anthropogenic impact on natural landscapes require modern cities to implement strategies for sustainable development of territories in general and improve techniques to strengthen the natural and ecological framework in particular. The purpose of the study is to identify regional features and problems of the formation of the ecological framework of Belgorod and to develop recommendations for ensuring a sustainable highly urbanized environment of a large city.

Materials and methods. A comprehensive approach, an analytical review of territorial planning documents and urban planning zoning, a problem analysis of the current state of the ecological framework of Belgorod, a SWOT analysis of the natural resource potential of the territory and an analogue modelling were applied.

Results. Regional peculiarities and problems of formation of the ecological framework of Belgorod are revealed. A SWOT analysis of the natural resource potential of the territory was carried out. Weaknesses and strengths, opportunities and threats were identified. The basic principles of the formation of the ecological framework of Belgorod are proposed: the prin-

ciple of continuity of green areas, the principle of decentralization of green zones, the principle of optimality of anthropogenic load, the principle of water-saving design; the principle of integration of gully-girder complexes into the natural and ecological framework; the principle of regeneration of landscapes of riverine territories; the principle of reclamation of spent quarries and their integration into the ecological framework.

Conclusions. The necessity of supplementing the materials “on the substantiation of the master plan for the development of the urban circle Belgorod until 2025” in terms of the development of an environmental framework scheme is justified. A conceptual spatial model if developed to strengthen the ecological framework of Belgorod. A number of recommendations are proposed to ensure comprehensive work to strengthen the ecological framework of the city.

KEYWORDS: large city, sustainable development, ecological framework, principles, natural framework

FOR CITATION: Dubino A.M., Perkova M.V. Formation of the ecological framework of Belgorod. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):167-179. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.167-179 (rus.).

Corresponding author: Anastasia M. Dubino, anastuzi@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обостряются противоречия между интенсификацией антропогенной деятельности и необходимостью сохранения и укрепления природных комплексов. Среди достаточно развитых направлений в отечественной практике планирования территорий выступает формирование и укрепление природно-экологического каркаса (ПЭК) города, представляющего собой систему взаимосвязанных природных территорий, которая обеспечивает сохранение биоразнообразия, поддержание экологического баланса и предоставление комплекса экосистемных услуг, таких как регулирование климата, очистка воды и воздуха, сохранение почв и рекреационные возможности. ПЭК лежит в основе формирования функционально-планировочной структуры населенных пунктов и межселенных территорий и выступает в качестве естественной экологической системы, в которую входят: особо охраняемые природные территории (ООПТ), озелененные территории различного назначения (городские леса и лесопарки, заповедники, парки, сады, скверы, бульвары, малые сады), гидрологическая сеть и ландшафтно-инженерные сооружения по регулированию уровня воды и другие элементы.

Стремительный рост городского населения, глобальная проблема изменения климата во всем мире [1], высокий уровень антропогенного влияния на естественные ландшафты требуют от современных городов внедрения стратегий устойчивого развития территорий в целом и совершенствования приемов по укреплению ПЭК в частности [2–4]. Проблема формирования устойчивых городских территорий охватывает все жизненные циклы культурных ландшафтов, учитывает многофункциональное назначение системы городского планирования, а также правовые, социальные и экологические компоненты, регулирующие ее развитие. Экологическая безопасность, сохранение природной среды, восстановление естественных ландшафтов, экологизация строительства и повышение экологической грамотности городских жителей — ряд аспектов, ориентированных на устойчивое развитие территорий [5].

Данное исследование носит прикладной характер и направлено на выявление региональных осо-

бенностей природного ресурсного потенциала и разработку мероприятий для укрепления и дальнейшего формирования ПЭК г. Белгорода. Актуальность исследования обусловлена наличием локальных не связанных между собой элементов природного каркаса города (парков), наличием овражно-балочных ландшафтов и нарушенных ландшафтов. Имеет место деградация ландшафтов приречных территорий.

В отечественных работах существует значительное количество терминов, предложенных различными авторами, которые по своему значению близки к понятию ПЭК: «экологический каркас» (В.В. Владимиров, Е.Ю. Колбовский, А.В. Елизаров, И.Л. Прыгунова, Т.П. Калихман, Н.А. Соболев, Э.Н. Сохина и Е.С. Зархина), «природный каркас территории» (Н.С. Краснощёкова, П. Кавалаяускас, Н.Ф. Реймерс), «биосферный каркас» (Э.Б. Алаев), «природоохранный каркас (зеленый каркас)» (А.А. Тишков), «природно-экологический каркас» (Ю.В. Волков, Т.Г. Нефедова, Т.Г. Рунова), «ландшафтно-экологический каркас» (Л.К. Казаков, А.А. Чибилев), «ландшафтный каркас» (А.А. Дьяченко, З.В. Лысенкова, И.Н. Ротанова), «кластерный опорный каркас» (Р.Г. Сафиуллин, Р.М. Сафиуллина) [6], «водно-зеленый городской каркас» (ВЗГК), «градо-экологический каркас» (О.Н. Воронина, Д.В. Толовёнок). Одним из первых, кто использовал термин «экологический каркас», является В.В. Владимиров. Под экологическим каркасом (ЭК) он понимает узлы и оси сосредоточения наибольшей экологической активности, с учетом которых рекомендует проводить урбоэкологическое зонирование территории [7, 8]. Е.Ю. Колбовский в своих трудах приводит комплексное понятие ЭК и определяет его как «набор и пространственное сочетание природных “диких” и культурных ландшафтов, обеспечивающих экологическую стабильность территории соответствующего уровня», а также как «совокупность экосистем с индивидуальным режимом природопользования, образующих пространственно-организационную инфраструктуру, предотвращая потерю биоразнообразия и деградацию ландшафта» [9]. Изучением вопроса формирования ЭК также занимались Э.Н. Сохина и Е.С. Зархина, и они предлагают использовать данное понятие для целостного восприятия террито-

рии [10]. И.Н. Ильина считает, что «привлекательные для жизни города должны быть обеспечены сильной и качественной каркасной инфраструктурой, что обеспечило бы стабильность и долгосрочность городского развития» [11]. Вышеперечисленные авторы предполагали системную основу понятия ЭК и выделяли его иерархические уровни: глобальный, бассейновый, региональный и локальный [12]. Авторами других концепций выступают Э.Б. Алаев [13], В.А. Николаев [14], Л.К. Казаков [15]. В работе Н.С. Краснощёковой «Формирование природного каркаса в генеральных планах городов» определение термина «природный каркас» отражено следующим образом: природный каркас города — это система открытых озелененных пространств, природных комплексов, формируемая на базе гидрографической сети с учетом геоморфологии и рельефа и во взаимосвязи с пригородным окружением [16].

Все рассмотренные исследования объединены одной целью: обеспечение благоприятных условий для развития территории, сохранения и укрепления исторических ландшафтов. А.В. Крашенинников называет экологический каркас «основанием пирамиды градостроительных ценностей», от устойчивости которого зависит благополучие людей [17]. Организация зеленых каркасов не только отвечает на запрос общества, но и служит необходимым элементом для развития города. Термин «каркас» в современной интерпретации понимается как внутренняя несущая конструкция структуры городского природного каркаса; как относительно неизменяемая, устойчивая во времени основа пространственно-планировочной организации градостроительной системы [18].

В данном исследовании используется термин «природно-экологический каркас», под которым понимается непрерывная система озелененных и обводненных территорий, которая регулирует водный баланс, борется с негативными последствиями климатических изменений и обладает рекреационной и средостабилизирующей функциями. Исследования в Белгородской области раскрывают методические подходы к проектированию и реализации региональной системы ЭК в условиях существующей практики землеустройства [19–21].

Цель исследования — выявление региональных особенностей и проблем формирования ПЭК г. Белгорода и разработка рекомендаций по обеспечению устойчивой высокоурбанизированной среды крупного города.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основано на применении экологического и комплексного подхода к проектированию городской среды, были проведены аналитический обзор документов территориального планирования и градостроительного зонирования, проблемный анализ текущего состояния ПЭК в г. Белгороде, SWOT-анализ природного ресурсного потенциала

территории, аналоговое моделирование. Разработаны рекомендации и мероприятия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Глобальная проблема изменения климата и высокий уровень урбанизации являются основными вопросами международной политической повестки дня и направлены на то, чтобы сделать города более пригодными для жизни, адаптироваться к изменению климата. Сегодня в городских районах проживает 54 % населения планеты, ожидается, что к 2050 г. урбанизируется более двух третей населения земного шара¹. Таким образом, подготовка городских пространств к растущему числу людей при одновременном развитии и поддержании городов в качестве устойчивых и пригодных для жизни — одна из важнейших задач городского планирования. Города формируют будущее нашей планеты, где люди сталкиваются с экологическими проблемами и преодолевают препятствия на пути устойчивого развития. Сохранение для настоящего и следующих поколений здоровых природных систем становится одной из актуальных проблем устойчивого развития урбанизированной территории [22]. Основопологающим в реализации устойчивости развития выступает достижение стратегического баланса между деятельностью человека и сохранением экологического равновесия.

Ландшафт высокоурбанизированной городской среды подвержен регулярным изменениям подобно живому организму. Постепенный рост городов приводит к уплотнению застройки, растущей урбанизации, потере исторических ландшафтов или их деградации, осушению территории. Это отрицательно сказывается как на природной компоненте, так и на жителях в городах. Экологическое равновесие представляет собой особую фазу состояния городской среды, при которой осуществляется естественная саморегуляция, защита и восстановление ключевых природных компонентов: воздуха, водных ресурсов, почвы, растительного покрова, биоразнообразия.

Как показывает имеющийся опыт, процессы разработки и актуализации документов территориального планирования, правил землепользования и застройки, мастер-планов территорий и других градостроительных документов, а также составление материалов по обоснованию решений базируются на основополагающих принципах, направленных на решение актуальных проблем и достижение целей градостроительного развития территорий.

Рассмотрим основные характеристики и региональные особенности ПЭК Белгорода. Белгородская область занимает южные и юго-восточные склоны Среднерусской возвышенности и является малообводненной и малооблесенной территорией, через которую

¹ Economic UNDO, Social Affairs (1999). Population division, world population prospects: the 1998 revision. Vol. 180. United Nations Publications.

проходят речные долины и густая овражно-балочная сеть [23, 24]. Территория Белгорода также характеризуется значительным расчленением овражно-балочной сетью и наличием карьеров строительных материалов. Эти геоморфологические особенности создают существенные препятствия для эффективного градостроительного планирования и комплексного благоустройства городской территории. Для анализа состояния ПЭК Белгорода была проведена комплексная экологическая оценка территории города, которая позволила установить степень экологической устойчивости исследуемой территории, а также уровень комфорта городского населения.

Согласно материалам по обоснованию документов территориального планирования, в г. Белгороде имеется ряд проблем, связанных с его природно-экологической составляющей:

- общая неблагоприятная экологическая обстановка, характеризующаяся «высоким загрязнением воздушного и водного бассейнов»;
- организация поверхностного стока в городе (ливневая канализация) практически отсутствует, что может способствовать возникновению новых оврагов;
- «санитарное состояние оврагов, как правило, неудовлетворительное», так как овраги в черте города зачастую являются «местом свалок всякого рода отходов и нечистот, а также водоприемниками различных бытовых стоков»;
- под городом на глубине 700–800 м расположены многочисленные месторождения полезных ископаемых (глина, песок и мел, залежи бокситов и железных руд);
- на территории города имеются пойменные участки, которые не защищены от затопления паводковыми водами;
- на территории города есть территории, подверженные эрозионным процессам и оползням;
- «откосы оврагов в ряде случаев имеют значительную крутизну и часто являются оползневыми»;
- «меловые породы в долинах рек сильно закарстованы»;
- на территории г. Белгорода «располагаются эксплуатируемые и отработанные карьеры глины и меловые карьеры»;
- значительные по площади территории с индивидуальной жилой застройкой находятся в санитарно-защитных зонах промышленных и коммунально-складских предприятий;
- низкий процент обеспеченности озелененных территорий².

Гидрологические особенности Белгорода вместе с железнодорожным каркасом разделяют город на че-

тыре условных района: северный, южный, восточный и западный. Лесные массивы, парки, скверы, аллеи и другие рекреационные пространства занимают 22,3 % от общей территории Белгорода и превышают площади территорий промышленных зон, что является положительным параметром при оценке качества городской среды. Общая площадь зеленых насаждений на 2024 г. составила 4890 га, а площадь зеленых насаждений общего пользования, приходящаяся на 1 жителя, — 35,8 м²/чел. Однако распределение зеленых территорий по городу демонстрирует значительную неравномерность, поэтому степень обеспеченности зелеными насаждениями в разных частях города существенно отличается. Крупные лесные массивы сосредоточены на периферии, в то время как зеленых зон внутри кварталов недостаточно для полноценного удовлетворения рекреационных потребностей жителей и поддержания экологического равновесия. Таким образом, ПЭК Белгорода включает элементы искусственного ландшафта внутри городской черты и фрагментов сохранившейся природной среды на территориях пригородной зоны. Наименьшая степень озеленения наблюдается в южной части города, наибольшая — в западной.

Говоря о структурных элементах ПЭК, в первую очередь, стоит выделить площадные элементы — экологические ядра, которые служат основой и представляют собой самодостаточные большие зеленые пространства на территории города. Существуют и другие территории меньшего размера и значения — точечные элементы, а также линейные элементы — экологические коридоры, которые создают непрерывную систему озеленения на всей территории города (рис. 1).

На территории Белгорода имеются ключевые элементы, которые могут стать «точками экологической активности» (по В.В. Владимирову) и сыграть важную роль в поддержании биоразнообразия и вопросах охраны природы. К таким объектам в городе относятся территории Архиерейской рощи и Ботанического сада, которые также следует использовать как связующие звенья в ПЭК города. Учитывая удобное расположение, данные территории могут быть площадками для проведения различных образовательных мероприятий и создания тематических садов, а также проектирования городского ландшафтного парка, идущего к центральной набережной. Все перечисленные элементы представляют собой экологические ядра и послужат опорными точками при формировании стратегии укрепления ПЭК Белгорода. Экологические коридоры, которые создают безопасные маршруты миграции и расселения для сохранения биоразнообразия, связывают не все ядра, на что следует обратить особое внимание. Основная доля экокоридоров в границах Белгорода приходится на южный, западный и северо-западный районы, где преобладает частный сектор, а также на периферию.

В ходе анализа документации было установлено, что принципы гармоничного градостроительно-

² Документы территориального планирования г. Белгорода. URL: <https://belgorod-r31.gosweb.gosuslugi.ru/deyatelnost/napravleniya-deyatelnosti/gradostroitelstvo/dokumenty-territorialnogo-planirovaniya/>

ЭЛЕМЕНТ КАРКАСА	ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ	FRAME ELEMENT	MAIN COMPONENTS
 ЭКОЯДРО	- национальные и природные парки; - леса 1-й и 2-й категорий; - заповедники и заповедные урочища - сельскохозяйственные угодья; - заказники (постоянные, временные, сезонные) Основная функция: сохранение природных комплексов, поддержание разнообразия местообитаний и видов, создание рекреационных условий	 ECO-CORE	- national and natural parks; - forests of the 1st and 2nd categories; - nature reserves and protected areas; - agricultural land; - nature reserves (permanent, temporary, seasonal). Main function: conservation of natural complexes, maintenance of diversity of habitats and species, creation of recreational conditions
 ЭКО-КОРИДОР	- линии связи и сооружения; - передаточные трубопроводы; - русла рек и поймы рек; - линейные зеленые насаждения (бульвары, аллеи и пр.); - элементы геоморфологии рельефа (овраги, балки и пр.); - озелененные коридоры транспортной и инженерной инфраструктуры Основная функция: сохранение целостности каркаса за счет соединения его элементов; защита речных русел и пойм, изоляция линейных зон антропогенной деятельности - автомобильных дорог, железных дорог и т.д.	 ECO-CORRIDOR	- communication lines and facilities; - transmission pipelines; - riverbeds and floodplains; - linear green spaces (boulevards, alleys, etc.); - elements of relief geomorphology (ravines, gullies, etc.); - green corridors of transport and engineering infrastructure. Main function: to preserve the integrity of the frame by connecting its elements; protection of riverbeds and floodplains; isolation of linear zones of anthropogenic activity - highways, railways, etc.
 ТОЧЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	- памятники природы различного профиля; - зеленые зоны небольших населенных пунктов, ключи; - охраняемые объекты неживой природы; - памятники истории и культуры Основная функция: охрана отдельных уникальных объектов природы и материальной культуры, выполнение защитных и ресурсосберегающих эстетических и социальных функций	 LOCAL ELEMENTS	- natural monuments of various profiles; - green areas of small settlements, keys; - protected objects of inanimate nature; - historical and cultural monuments. Main function: protection of individual unique objects of nature and material culture, performance of protective and resource-saving aesthetic and social functions
 БУФЕРНЫЕ ЗОНЫ	- водоохранные зоны; - охранные зоны ООПТ; - санитарно-защитные зоны; - шумовые и другие зоны дискомфорта; - охранные зоны водозаборов Основная функция: защитная функция отдельных участков от внешних воздействий	 BUFFER ZONES	- water protection zones; - protected areas of protected areas; - sanitary protection zones; - noise and other areas of discomfort; - security zones of water intakes. Main function: the protective function of individual sites from external influences

Рис. 1. Основные структурные природные элементы природно-экологического каркаса г. Белгорода (разработала А.М. Дубино)
Fig. 1. The main structural natural elements of the ecological framework of Belgorod (developed by A.M. Dubino)

го развития учитываются в недостаточной степени и приоритетное внимание уделяется росту и уплотнению застройки городского пространства. Также необходимо отметить, что материалы по обоснованию генерального плана г. Белгорода не содержат схемы природно-экологического (природного, экологического, водно-зеленого) каркаса территории². На существующей схеме охраны окружающей среды (рис. 2) отражены главные источники ее загрязнения, диаграммы выбросов и загрязнения поверхностных вод, а также природоохранные мероприятия. К основным источникам загрязнения приземных слоев атмосферы города относятся автомобильный транспорт и деятельность промышленных предприятий. Концентрация транспортных потоков в центральной части города, а также в северном и южном районах наиболее высокая. Крупнейшими загрязнителями на территории города являются ГУП «Белоблводоканал» и ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ», которые расположены в центре Белгорода.

В связи с этим, по мнению авторов, существует необходимость дополнения к материалам имеющейся градостроительной документации. В частности, разработки схемы ПЭК г. Белгорода. Исследована степень изменения природно-территориального комплекса, вызванного наличием старого и аварийного жилья как одного из источников подтопления и загрязнения почв в черте города. Наибольшее количество ветхого и аварийного жилья расположено в центральном, северном и южном районах города,

что обуславливает необходимость перепланировки и благоустройства этих районов (рис. 3).

В результате исследования проведен анализ доступности городских парков (центральный Парк культуры и отдыха им. В.И. Ленина, парк «Памяти», парк «Победы», детский парк развлечений «Котфей»), Ботанического сада и лесопарка «Сосновка». Радиусы доступности парков — 1200 м, сада — 600 м, лесопарка — 20 км. На основе полученных данных установлено, что лесопарковая зона находится в пределах транспортной доступности для южного и восточного планировочных районов, в то время как городские парки рассредоточены более равномерно и доступны жителям северного, южного и восточного районов.

В 2022 г. под руководством главного инженера института Ленгипрогор Ю.А. Перелыгина в Белгороде началась реализация проекта долгосрочного и устойчивого развития зеленой инфраструктуры за счет формирования природоподобных ландшафтов на основе понятия урбобиоценоза [25]. В период с июня 2022 по сентябрь 2023 г. в Белгороде в рамках исследования АНО «Зеленая инфраструктура городов»³ выполнялось натурное обследование зеленых насаждений. За это время было обследовано и занесено в базу данных 311 тыс. объектов озеленения. Количество единичных деревьев в г. Белгороде — 178,2 тыс., количество единичных кустарников — 72,7 тыс. По данным

³ ГИС «Зеленая инфраструктура городов». URL: <https://zigbel.ru/page45369361.html>



Рис. 2. Материалы по обоснованию генерального плана развития городского круга «город Белгород» до 2025 г. Схема охраны окружающей среды²

Fig. 2. Materials on the substantiation of the master plan for the development of the urban circle “Belgorod city” until 2025. Environmental protection scheme²

экспертов, общая площадь всех древесно-кустарниковых массивов, составляющих основу экологического каркаса города, — 2219 га.

На основе анализа ранее проведенных исследований, а также данных, в той или иной степени имеющих отношение к природному ресурсному потенциалу рассматриваемой территории, сформулированы ключевые принципы формирования ПЭК г. Белгорода:

- принцип непрерывности озелененных территорий;
- децентрализации зеленых зон;
- оптимальности антропогенной нагрузки;
- водосберегающего проектирования;
- интеграции овражно-балочных комплексов в ПЭК;
- регенерации ландшафтов приречных территорий;
- рекультивации отработанных карьеров и их интеграции в ПЭК.

Осуществлен SWOT-анализ и выявлены слабые и сильные стороны, угрозы и риски.

К *сильным сторонам* можно отнести:

- природные ландшафты: живописные овражно-балочные ландшафты с верхнемеловыми отложениями, которые являются уникальными высокоэстетичными природными объектами;

- биоразнообразие флоры и фауны;
- историко-культурный ресурсный потенциал: наличие объектов археологического наследия (курганов), фрагменты Белгородской черты;
- значительные по площади территории с индивидуальной жилой застройкой находятся в санитарно-защитных зонах промышленных и коммунально-складских предприятий.

Слабые стороны ПЭК:

- ограниченная защита имеющихся природных ядер;
- отсутствие непрерывности экологических «водно-зеленых» коридоров (вдоль рек Везёлка, Северский Донец, Гостёнка) при высокой антропогенной нагрузке и значительной степени деградации приречных территорий как результат несбалансированного землепользования;
- недостаточное количество ядер природного каркаса;
- в ряде случаев неудовлетворительное санитарное состояние оврагов, так как зачастую они являются «местом свалок всякого рода отходов и нечистот, а также водоприемниками различных бытовых стоков»;
- низкий процент обеспеченности озелененных территорий;
- «откосы оврагов в ряде случаев имеют значительную крутизну и часто являются оползневыми»;

• «меловые породы в долинах рек сильно закарстованы»².

Угрозы:

• не в полной мере удовлетворительная организация поверхностного стока в городе (ливневая канализация), что может способствовать возникновению новых оврагов;

• угроза осушения территории;

• угроза добычи полезных ископаемых открытым способом, так как под городом на глубине 700–800 м расположены многочисленные месторождения полезных ископаемых (глина, песок и мел, залежи бокситов и железных руд);

• наличие в городе территорий, подверженных эрозионным процессам и оползням;

• недостаток финансирования;

• отсутствие буферной территории между городом и пригородом, сформированная кольцом по периметру города «ковровая» высокоплотная застройка индивидуальными жилыми домами, кварталами таунхаусов и среднеэтажной застройкой;

• отсутствие в субурбанизированных пригородных микрорайонах (с индивидуальной жилой застройкой, кварталами таунхаусов и среднеэтажной застройкой парков скверов) рекреационных территорий в соответствии с нормируемыми площадями, хаотичное озеленение дорожной сети жителями;



Рис. 3. Карта возраста зданий г. Белгорода с 1917 по 1982 г.⁴

Fig. 3. Map of the age of buildings in Belgorod from 1917 to 1982⁴

⁴ Карта возраста зданий г. Белгорода с 1917 по 1982 г. URL: <https://belgorod.m207.ru/>

- повышенная антропогенная нагрузка и риск утраты имеющегося биоразнообразия;
- социальные конфликты;
- сложная геополитическая ситуация;
- нестабильность экономической ситуации, возможные трудности с финансированием проектов по охране природы.

Возможности:

- регенерация ландшафтов приречных территорий;
- рекультивация отработанных карьеров глин и меловых карьеров, террасирование ландшафтов;
- обводнение и озеленение овражно-балочных комплексов;
- создание новых озелененных территорий общего пользования;
- наличие пойменных участков, которые не защищены от затопления паводковыми водами;
- увеличение финансирования для охраны и укрепления элементов природного каркаса;
- разработка и реализация программ, поддержка научно-исследовательских проектов в области экологии и охраны окружающей среды.

Разработка концепции устойчивого развития городского землепользования требует всестороннего анализа специфических характеристик процесса формирования и функционирования территориальной системы, включая ее природный ресурсный потенциал, экологическую обстановку и социально-экономические условия. Необходимо также учитывать влияние как внешних, так и внутренних факторов, что позволит выявить оптимальные пути социально-экономической оптимизации использования городских земель. Этот подход предполагает введение определенных ограничений на использование городских и природных

ресурсов, а также разработку комплекса мероприятий по их реализации. Переход к устойчивому развитию современного городского землепользования в рамках данного исследования рассматривается через экологический аспект и эффективное использование природно-ресурсного потенциала, формирующего ПЭК города. К ключевым шагам в решении поставленных задач относятся:

- определение и утверждение экологических регламентов для озелененных территорий;
- разработка и внедрение программ по интеграции овражно-балочных ландшафтов и нарушенных территорий в виде компонентов ПЭК;
- внедрение инновационных водосберегающих технологий в городскую среду.

В рамках исследования разработана концептуальная пространственная модель г. Белгорода с целью укрепления и дальнейшего формирования ПЭК города (рис. 4). Она включает различные по функциональному назначению элементы озеленения и благоустройства, зоны общего пользования, а также зеленые элементы с интеграцией водосберегающих технологий. Сформирована модель укрепления и дальнейшего формирования ПЭК г. Белгорода. Основными инструментами для укрепления ЭК города стали: рекультивация нарушенных ландшафтов, укрепление и регенерация экоядер, экокоридоров, восстановление водно-болотных угодий, использование проницаемого мощения и дорожных медиан для сбора воды, реконструкция городских парков, а также проектирование водных объектов и создание дождевых садов. Опорными точками для проведения перечисленных мероприятий будут пойменные ландшафты рек Северский Донец, Везёлка и Гостёнка; территории открытых пространств: лесостепные

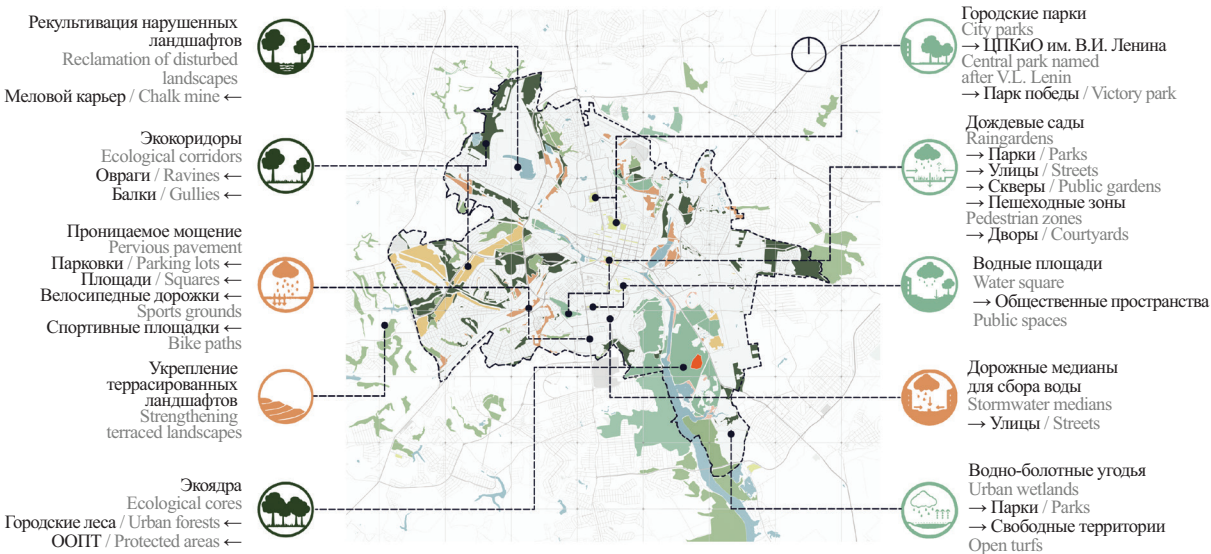


Рис. 4. Концептуальная пространственная модель укрепления природно-экологического каркаса г. Белгорода (разработали А.М. Дубино, М.В. Перькова)

Fig. 4. A conceptual spatial model for strengthening the ecological framework of the city of Belgorod (developed by A.M. Dubino, M.V. Perkova)

пространства, городские и пригородные леса и существующие рекреационные территории (лесопарк Сосновка, Архирейская роща), ООПТ и памятники природы. Парк Победы и ЦПКиО им. В.И. Ленина через линейные озелененные территории должны связать элементы зеленого каркаса центральной части города между собой для дальнейшего пути преобразования территорий в центре города и создания благоприятного микроклимата. На сегодняшний день оба городских парка нуждаются в восстановлении экологического качества ландшафта до уровня, предшествовавшего его нарушению. Наиболее остро вопрос стоит в парке Победы.

Для укрепления и дальнейшего формирования ПЭК Белгорода необходимо рассматривать несколько направлений деятельности: увеличение количества непрерывных зеленых насаждений верхнего, среднего и нижнего ярусов на всей территории города с чередованием площадных, линейных и точечных элементов; создание различных по своему функциональному назначению и антропогенной нагрузке озелененных территорий с элементами обводнения; проведение комплекса мероприятий по укреплению пойменных ландшафтов р. Северский Донец и сохранению поверхностных водотоков с целью стабилизации береговых линий, предотвращения эрозии и поддержания гидрологического режима. Целесообразно внедрение в городскую инфраструктуру проницаемых покрытий для улучшения водопроницаемости почв и снижения поверхностного стока. Требуется работа в отношении укрепления экосистемы в границах существующих экологических зеленых коридоров вдоль водотоков, восстановление экосистемы парка Победы, сохранение и укрепление элементов природного каркаса в рамках реконструкции парка им. В.И. Ленина, который подвергается усиленной антропогенной нагрузке, и особый подход к каждой функциональной зоне. В дополнение следует рассмотреть восстановление нарушенных территорий, что будет способствовать использованию их для городских нужд, в сельскохозяйственных и лесных целях, а также для создания рекреационных зон [26]. Например, экосистемы овражно-балочных комплексов включают большую долю редко посещаемых участков, однако на некоторых из них в границе города сохраняются естественные сообщества и встречаются редкие и исчезающие виды растений и животных [27]. Вторым примером является промышленная территория мелового карьера «Полигон». В границах данной площадки можно предложить развитие рекреационной инфраструктуры и аргоиндустриальный парк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены региональные особенности и проблемы формирования ПЭК г. Белгорода. Проведен SWOT-анализ природного ресурсного потенциала

территории. Предложены основные принципы формирования ПЭК г. Белгорода: принцип непрерывности озелененных территорий, децентрализации зеленых зон, оптимальности антропогенной нагрузки, водосберегающего проектирования; интеграции овражно-балочных комплексов в ПЭК; регенерации ландшафтов приречных территорий; рекультивации отработанных карьеров и их интеграции в ПЭК.

Одной из основных целей, зафиксированных в материалах по обоснованию генерального плана развития городского округа «город Белгород», должно быть создание единого «зеленого пояса» города и буферных зон между городом и высокоурбанизированным пригородом посредством укрепления и/или восстановления существующих природных ядер, экологических коридоров и формирования новых на основе имеющегося ресурсного потенциала на основе имеющихся овражно-балочных комплексов, а также локальных площадных и линейных элементов зеленого каркаса для создания необходимого условия его непрерывности, организации маршрутов миграции, проживания мелких животных и сохранения биоразнообразия.

Обоснована необходимость дополнения существующих материалов генерального плана развития городского округа «город Белгород» до 2025 г. в части разработки схемы ПЭК г. Белгорода и подтверждена целесообразность использования предложенных инструментов. Разработана концептуальная пространственная модель укрепления ПЭК г. Белгорода. Для обеспечения комплексной работы по укреплению ПЭК города предлагается ряд рекомендаций:

- разработка сценариев укрепления ПЭК разного масштаба (от глобальных и долгосрочных идей до быстрореализуемых, требующих минимальных финансовых и временных затрат);
- рациональное распределение рекреационной нагрузки на озелененные территории и ее снижение в границах уникальных ландшафтов. Разработка экологических, культурно-познавательных, спортивных, рекреационных, событийных организованных туристических маршрутов;
- формирование новых экологических ядер, экологических коридоров, площадных и линейных элементов на основе имеющегося ресурсного потенциала: овражно-балочных комплексов, нарушенных ландшафтов, отработанных карьеров;
- укрепление/восстановление существующих экологических ядер и экологических коридоров, в том числе регенерация ландшафтов приречных территорий рек Северский Донец, Везёлка, Гостёнка;
- интеграция технологий водосберегающего проектирования, внедрение технологий обводнения территории (например, имеющихся оврагов);
- внедрение природных компонентов в различные функциональные зоны, озеленение повышенной

плотности территорий, прилегающих к объектам социальной инфраструктуры, озеленение общественных пространств, новых парковых зон в строящихся микрорайонах, многоярусное озеленение улично-дорожной сети;

- активное использование при управлении развитием территории существующих форм и программ государственной и социальной поддержки и вовлечение потенциально возможных инвесторов в озелене-

ние территорий, регенерацию ландшафтов и укрепление природного каркаса в целом.

Предложенные рекомендации позволят сформировать непрерывный «зеленый пояс» на территории г. Белгорода с целью укрепления природных комплексов, сохранения биоразнообразия и ценных природных ландшафтов, а также регулирования стока ливневых вод и улучшения микроклимата городских территорий различного функционального назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Onuoha D.C., David D., Odo C.C., Ulas J.O.J. Urban planning as a tool for climate change adaptation and mitigation in the 21st century national development : a review // Research Journal of Pure Science and Technology. 2024. Vol. 7. Issue 2. Pp. 70–88. DOI: 10.56201/rjps.v7.no2.2024.pg70.88

2. Mahmoud I. Nature-based Solutions across different spatial urban scales: an analysis of three cases studies from Nice, Utrecht, and Milan // Urban Design and Planning. 2024. Vol. 177. Issue 3. Pp. 109–122. DOI: 10.1680/jurdp.23.00063

3. Vitulano V. Integrating green infrastructure in Italian urban plans. Lessons from Turin and Bologna // Urban Design and Planning. 2024. Vol. 177. Issue 2. Pp. 45–56. DOI: 10.1680/jurdp.22.00049

4. Grădinaru S.R., Hersperger A.M. Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions // Urban Forestry & Urban Greening. 2019. Vol. 40. Pp. 17–28. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.018

5. Дубино А.М., Перькова М.В. Анализ зарубежного опыта водосберегающего проектирования городских территорий // Техническая эстетика и дизайн-исследования. 2021. Т. 3. № 3. С. 24–33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33. EDN VNQDVY.

6. Таргаева Е.Е. Особенности формирования модели экологического каркаса индустриального города ресурсного региона (на примере городов Новокузнецк и Прокопьевск) : дис. ... канд. геогр. наук. Новокузнецк, 2022. 180 с. EDN GIJZMB.

7. Владимиров В.В. Актуальность предпосылки экологического программирования в районной планировке // Вопросы географии. 1980. № 113. С. 109–117.

8. Владимиров В.В. Расселение и окружающая среда. М. : Стройиздат, 1982. 228 с.

9. Колбовский Е.Ю., Морозова В.В. Ландшафтное планирование и формирование сетей охраняемых природных территорий. М., 2001. 152 с. EDN TRQQGZ.

10. Сохина Э.Н. Экологический каркас территории как основа системного нормирования природопользования // Проблемы формирования стратегии природопользования. 1991. С. 194–200.

11. Ильина И.Н. Качество городской среды как фактор устойчивого развития муниципальных образований // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2015. № 5 (164). С. 69–82. EDN RTPZFB.

12. Пономарев А.А., Байбаков Э.И., Рубцов В.А. Экологический каркас: анализ понятий // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2012. Т. 154. № 3. С. 228–238. EDN PUHVNN.

13. Алаев Э.Б. Биосферный каркас и урбанизированные зоны. Физико-географические аспекты изучения урбанизированных территорий : тез. докл. науч. конф. 1992. С. 5.

14. Николаев В.А. Культурный ландшафт — геоэкологическая система // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2000. № 6. С. 3–8.

15. Казаков Л.К. Ландшафтоведение с основами ландшафтного планирования : учебное пособие. М. : Академия, 2008. 334 с. EDN QKNWVD.

16. Краснощекова Н.С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов : учебное пособие. М. : Архитектура-С, 2010. 184 с.

17. Крашенинников А.В. Градостроительное развитие жилой застройки: исследование опыта зарубежных стран. М. : Архитектура-С, 2005. 112 с.

18. Жильцова О.К. Современное понятие «Городской природный каркас». Его развитие и осмысление // Инновации и инвестиции. 2023. № 2. С. 150–154. EDN ZUHRYU.

19. Стаценко Е.А., Жеребенко Ю.С., Корнилов А.Г. О структуре экологического каркаса Красногвардейского района Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2009. № 11 (66). С. 140–146. EDN MUMMRL.

20. Стаценко Е.А., Корнилов А.Г., Жеребенко Ю.С. Объекты экологического каркаса в структуре землеустройства Красногвардейского района Белгородской области // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2011. № 1 (73). С. 79–84. EDN RMYIAZ.

21. Стаценко Е.А., Корнилов А.Г., Жеребенко Ю.С. Овражно-балочные комплексы в системе

экологического каркаса староосвоенных регионов (на примере Завидовского сельского округа Яковлевского района Белгородской области) // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах : мат. IV Междунар. науч. конф. 2010. С. 172–175.

22. Дьячкова О.Н. Принципы стратегического планирования развития «зеленой» инфраструктуры городской среды // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 8. С. 1045–1064. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064. EDN VYVVNR.

23. Ладик Е.И., Перькова М.В. Принципы и методы архитектурно-планировочной организации рекреационных территорий с учетом региональных особенностей Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 7. С. 46–52. DOI: 10.12737/article_5940f0187760c0.79965719. EDN ZDCZRH.

24. Перькова М.В., Трибунцева Е.И., Крушельницкая Е.И. Особенности развития Белгородского региона и его элементов // Региональная научно-

техническая конференция по итогам ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимая Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области : сб. докл. 2016. С. 265–275. EDN XDYSZB.

25. Перелыгин Ю.А., Проскуряков В.В., Сорокина Е.М. Типология урбобиоценоза // Научный Альманах ассоциации France-Kazakhstan. 2023. № 1. С. 150–157. EDN CQRLSH.

26. Галдин Р.Е., Алейникова Н.В., Ярмош Т.С. Формирование рекреационных зон путем использования нарушенных городских земель // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 12. С. 73–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-73-83. EDN EKTТАО.

27. Дроздова Е.А., Корнилов А.Г., Белицкая Ю.С. Экологический каркас в схеме землеустройства Белгородской области // Геология, география и глобальная энергия. 2013. № 4 (51). С. 182–191. EDN RVZAZB.

Поступила в редакцию 19 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анастасия Михайловна Дубино** — аспирантка кафедры архитектуры и градостроительства; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова** (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1170729, ResearcherID: KYR-8282-2024, ORCID: 0000-0001-8647-4415; anastuzi@gmail.com;

Маргарита Викторовна Перькова — доктор архитектуры, доцент, директор Высшей школы дизайна и архитектуры, советник РААСН; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 406847, Scopus: 55876784300, ResearcherID: AGZ-6599-2022, ORCID: 0000-0002-0199-0857; perkova.margo@mail.ru.

Вклад авторов:

Дубино А.М. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций.

Перькова М.В. — научное руководство, развитие методологии исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Onuoha D.C., David D., Odo C.C., Ulasi J.O.J. Urban planning as a tool for climate change adaptation and mitigation in the 21st century national development : a review. *Research Journal of Pure Science and Technology*. 2024; 7(2):70-88. DOI: 10.56201/rjps.v7.no2.2024. pg70.88

2. Mahmoud I. Nature-based Solutions across different spatial urban scales: an analysis of three cases studies from Nice, Utrecht, and Milan. *Urban Design and Planning*. 2024; 177(3):109-122. DOI: 10.1680/jurdp.23.00063

3. Vitulano V. Integrating green infrastructure in Italian urban plans. Lessons from Turin and Bologna.

Urban Design and Planning. 2024; 177(2):45-56. DOI: 10.1680/jurdp.22.00049

4. Grădinaru S.R., Hersperger A.M. Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 40:17-28. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.018

5. Dubino A., Per'kova M. Analysis of foreign experience in water-saving design of urban territories. *Technical Aesthetics and Design Research*. 2021; 3(3):24-33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33. EDN VNQDVY. (rus.).

6. Targaeva E.E. *Features of the formation of the model of the ecological framework of the industrial*

city of the resource region (on the example of the cities of Novokuznetsk and Prokopyevsk). Novokuznetsk, 2022; 180. EDN GIJZMB. (rus.).

7. Vladimirov V.V. The relevance of the premise of environmental programming in district planning. *Geography Issues*. 1980; 113:109-117. (rus.).

8. Vladimirov V.V. *Settlement and environment*. Moscow, Stroyizdat, 1982; 228. (rus.).

9. Kolbovskiy E.Yu., Morozova V.V. *Landscape planning and formation of networks of protected natural areas*. Moscow, 2001; 152. EDN TRQQGZ. (rus.).

10. Sohina E.N. The ecological framework of the territory as the basis for the systematic regulation of environmental management. *Problems for formation of nature conservation strategy*. 1991; 194-200. (rus.).

11. Ilyina I.N. Quality of urban environment as a factor of sustainable community development. *Property Relations in the Russian Federation*. 2015; 5(164):69-82. EDN RTPZFB. (rus.).

12. Ponomarev A.A., Baybakov E.I., Rubtsov V.A. The ecological framework: an analysis of concepts. *Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*. 2012; 154(3):228-238. EDN PUHVNN. (rus.).

13. Alaev E.B. Biosphere framework and urbanized zones. *Physical and geographical aspects of the study of urbanized territories: abstracts of scientific conference reports*. 1992; 5. (rus.).

14. Nikolaev V.A. Cultural landscape — geoecological system. *Bulletin of Moscow University. Episode 5: Geography*. 2000; 6:3-8. (rus.).

15. Kazakov L.K. *Landscape studies with the basics of landscape planning: textbook*. Moscow, Academy, 2008; 334. EDN QKHWVD. (rus.).

16. Krasnoshchekova N.S. *Formation of the natural framework in the master plans of cities: textbook*. Moscow, Arkhitektura-S, 2010; 184. (rus.).

17. Krashenninikov A.V. *Urban development of residential buildings: a study of the experience of foreign countries*. Moscow, Arkhitektura-S, 2005; 112. (rus.).

18. Zhiltsova O.K. Modern concept “urban natural framework”. *Its development and comprehension. Innovation & Investment*. 2023; 2:150-154. EDN ZUHRY. (rus.).

19. Statsenko E.A., Zherebnenko Yu.S., Kornilov A.G. On the structure of the ecological framework of the Krasnogvardeisky district of the Belgorod region. *Scientific bulletins of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences*. 2009; 11(66):140-146. EDN MUMMRL. (rus.).

20. Statsenko E.A., Zherebnenko Yu.S., Kornilov A.G. Objects of the ecological framework in the structure of land management of the Krasnogvardeisky district of the Belgorod region. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*. 2011; 1(73):79-84. EDN PMYIAZ. (rus.).

21. Statsenko E.A., Kornilov A.G., Zherebnenko Yu.S. Ravine-girder complexes in the ecological framework system of old-developed regions (on the example of Zavidovsky rural district of Yakovlevsky district of Belgorod region). *Problems of environmental management and the environmental situation in European Russia and neighboring countries: materials of the IV International Scientific Conference*. 2010; 172-175. (rus.).

22. D'yachkova O.N. Principles of strategic planning for the development of “green” infrastructure of the urban environment. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(8):1045-1064. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064. EDN VYVVR. (rus.).

23. Ladik E.I., Perkova M.V. Principles and methods of architectural and planning organization of recreational areas, taking into account the regional characteristics of the Belgorod region. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov*. 2017; 7:46-52. DOI: 10.12737/article_5940f018776-0c0.79965719. EDN ZDCZRH. (rus.).

24. Per'kova M.V., Tribuntseva E.I., Krushel'nikskaya E.I. Features of the development of the Belgorod region and its elements. *Regional Scientific and Technical Conference on the results of oriented fundamental research on interdisciplinary topics conducted by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region: collection of reports*. 2016; 265-275. (rus.).

25. Perelygin Yu.A., Proskuryakov V.V., Sorokina E.M. Typology of urbobiocenosis. *Scientific Almanac of the France-Kazakhstan Association*. 2023; 1:150-157. EDN CQRLSH. (rus.).

26. Galdin R., Aleinikova N., Yarmosh T. Formation of recreational areas by using disturbed urban lands. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2021; 12:73-83. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-73-83. EDN EKTAAO. (rus.).

27. Drozdova Ye.A., Kornilov A.G., Belitskaya Yu.S. Ecological frame in the plan of organization of the use of land of Belgorod oblast. *Geology, Geography and Global Energy*. 2013; 4(51):182-191. EDN RVZAZB. (rus.).

Received August 19, 2024.

Adopted in revised form on October 28, 2024.

Approved for publication on October 28, 2024.

BIONOTES: Anastasia M. Dubino — postgraduate student of the Department of Architecture and Urban Planning; Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU); 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1170729, ResearcherID: KYR-8282-2024, ORCID: 0000-0001-8647-4415; anastuzi@gmail.com;

Margarita V. Perkova — Doctor of Architecture, Associate Professor, Director of the Higher School of Design and Architecture, Advisor of RAASN; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 406847, Scopus: 55876784300, ResearcherID: AGZ-6599-2022, ORCID: 0000-0002-0199-0857; perkova.margo@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anastasia M. Dubino — collecting material, processing material, writing source text, creating illustrations.

Margarita V. Perkova — scientific guidance, development of research methodology, scientific text editing, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Модель «острова тепла» урбанизированных территорий и его трансформация

Адхам Иминжанович Гиясов¹, Оксана Николаевна Сокольская²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ); г. Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается вопрос формирования «острова тепла», отличающегося активной термо- и аэродинамической характеристикой в воздушной зоне городского приземного слоя атмосферы «острова тепла». Изучение теплового режима города, опирающееся на местные климатические и экологические данные, является наиболее актуальной задачей в вопросе формирования и трансформации городского «острова тепла». Условия комфортного пребывания человека в городах, расположенных в южных широтах, неразрывно связаны с радиационным воздействием под влиянием солнечной радиации, которое усугубляется влиянием «острова тепла». Составление модели трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла», а также зависимость трансформации над различными видами морфотипов деятельной поверхности городской инфраструктуры — основная задача исследования.

Методы и материалы. На основе обобщения ряда результатов метеорологических, климатических, микроклиматических и теплофизических исследований разработан программный комплекс для изучения процесса формирования и трансформации «острова тепла». Использованы данные в виде спутниковых снимков с космического аппарата Landsat-8 с сенсором TIRS.

Результаты. Анализ результатов теоретических исследований и расчетов формирования и трансформации тепловой оболочки городской территории при помощи компьютерного моделирования показал зависимость качественных и количественных термодинамических и аэродинамических характеристик «острова тепла» и коэффициента турбулентности. Установлено, что коэффициент турбулентности напрямую влияет на трансформацию купола «острова тепла» в направлении перемещения основного потока ветра. При этом чем больше коэффициент, тем динамичнее трансформация купола по длине X и по высоте Z.

Выводы. Разработанная методика качественной и количественной оценки тепло-ветрового режима модели городского «острова тепла» и его трансформации позволяет предварительно прогнозировать и производить оценку температурного поля тепловой воздушной оболочки городской среды. Составлена модель трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла» с разнообразными морфотипами деятельной поверхности городской инфраструктуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: остров, тепло, город, инсоляция, температура, застройка, ветер, турбулентность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гиясов А.И., Сокольская О.Н. Модель «острова тепла» урбанизированных территорий и его трансформация // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 180–192. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.180-192

Автор, ответственный за переписку: Адхам Иминжанович Гиясов, GiyasovAI@gic.mgsu.ru, adham52@mail.ru; Оксана Николаевна Сокольская, ons33@mail.ru.

The model of “heat island” of urbanized territories and its transformation

Adham I. Giyazov¹, Oksana N. Sokolskaya²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² Kuban State Technological University (KubSTU); Krasnodar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issue of the formation of a “heat island”, characterized by active thermal and aerodynamic characteristics in the air zone of the urban surface layer of the atmosphere of the “heat island” is considered. The study of the thermal regime of the city, based on local climatic and environmental data, is the most urgent task in the formation and transformation of the “urban heat island”. The conditions of a comfortable human stay in cities located in southern latitudes are inextricably linked with radiation exposure under the influence of solar radiation, which are aggravated by the influence of the “heat island”. Compilation of a model of transformational changes in the air dome of the “heat island”, as well as the dependence of transformation on various types of morphotypes of the active surface of urban infrastructure is the main objective of this study.

Methods and materials. Based on the generalization of a number of results of meteorological, climatic, microclimatic and thermophysical studies, a software package was developed to study the process of formation and transformation of the “heat island”. The data was used in the form of satellite images from the Landsat-8 spacecraft with a TIRS sensor.

Results. The analysis of the results of theoretical studies and calculations of the formation and transformation of the thermal envelope of an urban area using computer modelling showed the dependence of the qualitative and quantitative thermodynamic and aerodynamic characteristics of the “heat island” and the turbulence coefficient. It is established that the turbulence coefficient directly affects the transformation of the dome of the “heat island” in the direction of movement of the main wind flow. At the same time, the higher the coefficient, the more dynamic the transformation of the dome along the length X and height Z .

Conclusions. The developed methodology of qualitative and quantitative assessment of the heat and wind regime of the urban “heat island” model and its transformation allows preliminary forecasting and assessment of the temperature field of the thermal air envelope of the urban environment. A model of transformational changes in the air dome of the “heat island” with various morphotypes of the active surface of the urban infrastructure is compiled.

KEYWORDS: island, heat, city, insolation, temperature, building, wind, turbulence

FOR CITATION: Giyasov A.I., Sokolskaya O.N. The model of the “heat island” of urbanized territories and its transformation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):180-192. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.180-192 (rus.).

Corresponding authors: Adham I. Giyasov, GiyasovAI@gic.mgsu.ru, adham52@mail.ru; Oksana N. Sokolskaya, ons33@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Демографическое развитие и процесс урбанизации являются одними из характерных особенностей современной градоекологии. Степень воздействия человека при этом на окружающую среду сопоставима с естественными процессами. Корректная оценка данного воздействия — приоритетная в направлении экологии в целях ее регулирования. В связи с этим актуальный вопрос в градоекологии — изучение формирования городского «острова тепла» (ГОТ) и его трансформация.

Существует ряд научных исследований, которые доказывают, что значительное влияние на радиационно-тепловые характеристики воздушной зоны ГОТ оказывают неоднородные масштабные энергоактивные поверхности подстилающей городской застройки, в которой проживают тысячи, а иногда и миллионы горожан.

Данные исследования представлены такими научными институтами, как Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российский университет дружбы народов, Московский центр фундаментальной и прикладной математики совместно с Рурским университетом в Бохуме, Фрайбургским университетом и Берлинским техническим универ-

ситетом Германии. Установлено, что весомый вклад в ГОТ вносят неоднородные энергоактивные поверхности городской застройки большого масштаба, в которой проживают десятки миллионов людей (рис. 1). При этом города превращаются в накопители энергии за счет потребляемой $1,5 \cdot 10^{13}$ кДж/км²/год энергии, часть которой выделяется в окружающую среду, повышая температуру воздуха на 6–8 °С, иногда в безоблачные дни до 10–11 °С за счет техногенной деятельности и термического режима крупномасштабного энергоактивного подстилающего покрытия (рис. 2).

Интенсивность «острова тепла» и величина тепловой оболочки в нем зависят от антропогенных и техносферных факторов деятельности человека, а также от размеров города и численности населения. При численности населения 8–10 млн чел. контраст температуры между городом и пригородом составляет около 8–9 °С.

Один из ярких примеров научных исследований в этой области — работа Т.Р. Оке [1], в которой предпринята попытка связать разницу температур между городской и сельской местностью на основе численности населения города. Однако выяснилось, для того чтобы описать сложность зависимости температурных показателей и сравнить их между собой, требуются дополнительные результативные данные.

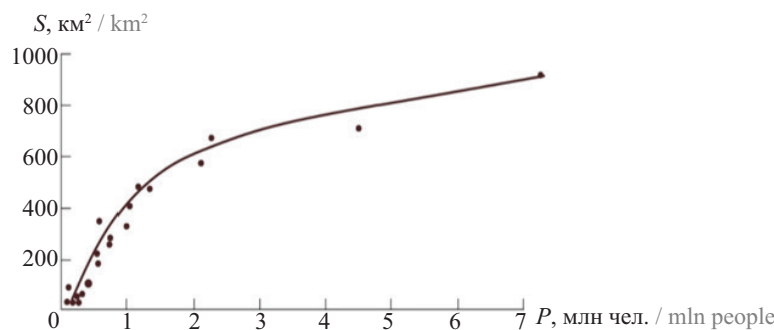


Рис. 1. Зависимость площади городской территории от численности населения

Fig. 1. Dependence of the urban area on the population

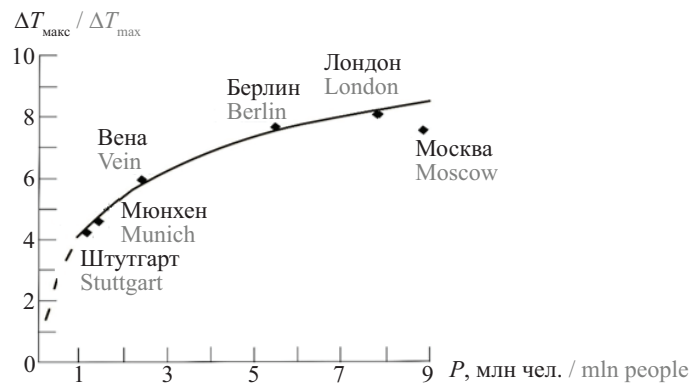


Рис. 2. Среднегодовая разность температуры воздуха в городе и пригороде в зависимости от численности населения (P)
Fig. 2. The average annual difference in air temperature in the city and suburbs, depending on the population (P)

Рассматриваемому вопросу посвящены классические труды зарубежных исследователей [2–8].

В нашей стране первые исследования о климате Москвы выполнены в 1826 г. Д.М. Перовишковым. Далее они были продолжены в советский период и в настоящее время нашли отражение в работах ряда отечественных авторов [9–15].

Городской «остров тепла» в более континентальном климате при низкой скорости ветра и штиле более устойчив. В этот момент различие температуры воздуха между городом и окраиной в теплый период достигает максимальных величин, в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске до 8–12 °С, в Краснодаре, Ростове-на-Дону, Астрахани, Алматы, Ташкенте, Душанбе до 15 °С, в условиях зимнего антициклона может быть на 6–8 °С выше [16, 17].

При построении модели «острова тепла» городов модель следует рассматривать в двух характерных режимах — зимой и летом. Зимой основное воздействие на «остров тепла» оказывают городские тепловые выбросы, связанные с деятельностью жи-

телей. В летний период, когда общий расход топлива уменьшается, возрастает приток солнечной радиации, который в сочетании с тепловыми выбросами от населения, транспорта, промышленности, а также другими антропогенными тепловыми выбросами способствует концентрации большого количества энергии в городах (рис. 2).

На рис. 3 представлен процесс трансформации «острова тепла» над городом. Определение уровня трансформации над урбанизированной поверхностью при помощи компьютерных программ позволяет определить условия формирования климатических и экологических условий в атмосферной городской среде на макро-, мезо- и микроуровне градостроительного проектирования.

Установлено, что потоки коротковолновой радиации в городе на 5–10 % меньше, а потоки длинноволновой на 5–15 % больше, чем в пригороде.

Эффект формирования повышенных температурных показателей в воздушной зоне «теплового острова» над крупными территориальными арее-

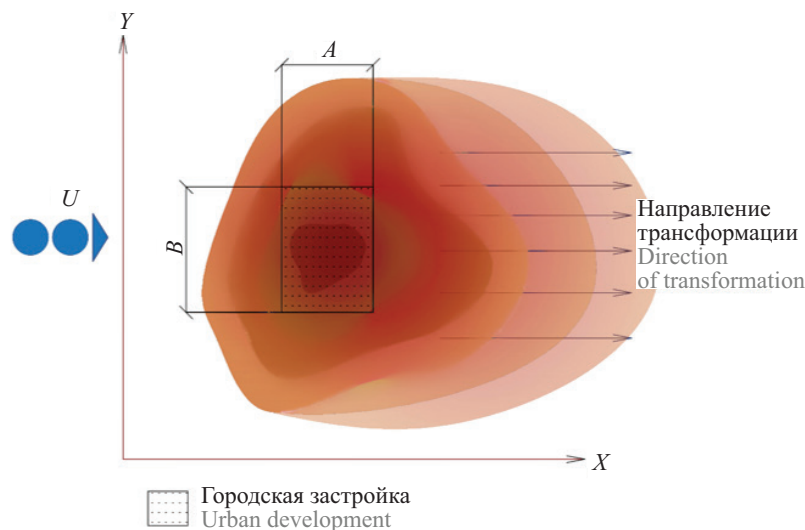


Рис. 3. Модель трансформации городского «острова тепла»
Fig. 3. Model of urban “heat island” transformation

лами проживания людей в последнее время приобрел особую остроту, хотя известен довольно давно, еще с XVIII в.

Доказано, что процесс урбанизации приводит к изменению характера градоклиматических условий атмосферной среды в крупных городах. Поскольку города способствуют повышению температурных показателей, «остров тепла» в повышенных слоях атмосферы ограничен так называемым «пузырем» тепловой оболочки. Это доказывают исследования, проведенные американскими научными специалистами в крупном городе на юго-востоке США в Атланте, а также учеными в России и на территории СНГ — в Краснодаре, Москве, Санкт-Петербурге, Ашхабаде. В целом исследования свидетельствуют о том, что в зависимости от величины города, а также индивидуальных свойств подстилающей поверхности температура в центральной части города в среднем на 6–10 °C выше, чем на окраинах [18–20].

При этом оценка и анализ теплового загрязнения городов выполняются за счет выделения тепла из источников теплового излучения — населения, транспорта, промышленных и коммунально-бытовых предприятий, ТЭЦ и др., которые под влиянием ветра трансформируются.

Одними из существенных факторов формирования городского «острова тепла» являются интенсивность солнечной радиации, теплоемкость деятельного слоя городов, отражательное и излучательное свойство, преобразуемое в тепло подстилающей поверхности застройки и атмосферы приземного слоя, впоследствии снижающие комфортные условия городской среды [21–23].

В городах южного региона, в которых интенсивность солнечной радиации в теплый период достигает до 980 Вт/м², температура воздуха в тени до +45 °C, на солнце до +50 °C, термический нагрев деятельной поверхности территории и застройки до +70 °C, доминирующую роль в тепловом загрязнении городов играют факторы климата.

В последние годы при помощи картографирования теплового поля появилась возможность его оценки, а также создания динамической модели изображения. При этом в таких науках, как градоэкология, геоэкология, биология и сельское хозяйство рассматриваются экологические задачи на макро-, мезо- и микроуровне городской среды [24–26].

Стоит учитывать, что качественные и количественные показатели воздушной зоны «острова тепла» влияют на ряд факторов качества проживания в городе. Экологическое загрязнение воздушной среды напрямую отображается на уровне заболевания и смертности населения. Повсеместное кондиционирование влечет за собой увеличение экономических затрат и влияет на количество парниковых газов, выбрасываемых в окружающую среду.

Именно поэтому в современном градостроительстве проблема определения поверхностной

температуры деятельного слоя городов, формируемой множеством факторов, таких как поступающая радиационно-тепловая энергия или индивидуальные антропогенные показатели, а также изучение влияния и трансформации «острова тепла» на прилегающую пригородную территорию и объекты городской инфраструктуры становятся все более востребованными.

Цель исследования — составление модели трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла» с разнообразными морфотипами деятельной поверхности городской инфраструктуры.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Метод, использованный в статье, — разработка и применение программного комплекса для изучения процесса формирования и трансформации «острова тепла» на основе обобщения результатов метеорологических, климатических, микроклиматических и теплофизических исследований, проведенных в городах: Бишкек, Бука, Душанбе, Краснодар, Новороссийск и Ташкент. Эти города характеризуются плотной многоэтажной застройкой, мощением дорог и площадок асфальтовым и бетонным покрытием и другими энергоактивными материалами.

В основу методики исследования программно-го моделирования положены натурные масштабные инструментальные метеорологические исследования мезоклиматических, микроклиматических и аэродинамических процессов пограничного слоя воздуха. Применены данные Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института им. В.А. Бугаева.

Использованы методы оценки и анализа результатов научных исследований термического нагрева деятельной поверхности города Краснодара в виде спутниковых снимков с космического аппарата Landsat-8 с сенсором TIRS, а также представлены тепловизионные снимки, которые получены во время натурных исследований в городах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Города становятся все более уязвимыми под негативным воздействием жары на человека. В этой связи исследования, проводимые в аспекте «Тепловая безопасность в изменении климата» проблемы «Биосферная совместимость», являются приоритетными.

Отмечается, что в регионах южных географических широт в формировании температурного поля приземного слоя атмосферы «острова тепла» роль взаимодействия солнечной радиации с подстилающей городской поверхностью значительна. Существенным влиянием отличаются теплообменные и аэродинамические процессы между энергоактивными деятельными поверхностями городской застройки. В статье особое внимание уделено климатическим и теплофизическим факторам, формирующим город-



Рис. 4. Купол загрязнения городов Душанбе (а); Бишкек (b); Дели (с)
Fig. 4. Pollution dome of the cities of Dushanbe (a); Bishkek (b); Delhi (c)

ской воздушный купол «острова тепла» и его подвижность.

На основе теоретических исследований и анализа результатов натурных исследований метеорологических, теплофизических и аэродинамических факторов сформулирован ряд положений, имеющих большое значение в тепловом загрязнении городов.

«Остров тепла» разрушается при наличии ветра или под воздействием атмосферных осадков, но устойчив в маловетрие и штиль, способствующие образованию купола загрязнения воздуха над городом (рис. 4).

Помимо этого, на макромасштабе городского «острова тепла» тепловые пятна городской подстилающей поверхности микромасштаба влияют на циркуляцию воздушных масс атмосферы за счет формирующихся конвективных потоков и значительной вертикальной скорости воздушных масс до 10 м/с, поднимающихся вверх, что способствует рассеиванию экологических неблагоприятных загрязнений в атмосфере города.

В целом территория городской поверхности представляет собой своеобразное тепловое плато, где прослеживается зависимость концентрации тепловых пятен с высокой степенью температурных показателей и зависимость температурных показателей от объемно-планировочной структуры. Термическая неоднородность плато нарушается под влиянием «островов прохлады» (водных и озелененных поверхностей)

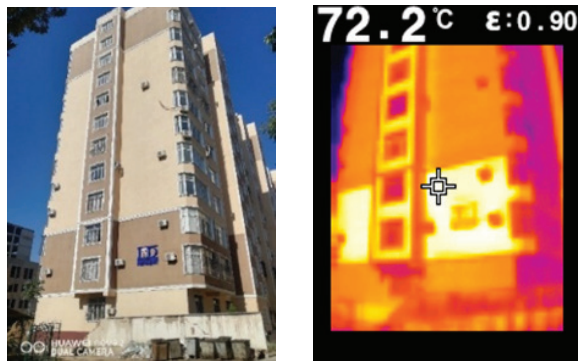


Рис. 5. Термический нагрев стен зданий в г. Ташкенте в летнее время года
Fig. 5. Thermal heating of the walls of buildings in the city of Tashkent in summer

и морфологии застройки гражданских и промышленных объектов.

В среднем в южных регионах термический нагрев деятельного слоя структуры городского ландшафта в зависимости от объемно-планировочной морфологии застройки составляет: стены зданий +72 °С и более, открытая территория жилой застройки +64 °С, нагрев плотной застройки +54 °С, территории общественного центра +68 °С, территория парковой зоны +36 °С, озеро +22 °С (рис. 5).

Высота солнца над горизонтом играет важную роль в поступлении природной энергии на города, в последующем поглощении и излучении тепла искусственной деятельной поверхностью урбанизированных территорий.

Наибольшее количество тепла за сутки поступает на стены зданий разной ориентации и на горизонтальные искусственные энергоактивные подстилающие поверхности в летние безоблачные дни, что приводит к нагреву подстилающих искусственных покрытий, а также тепломеханических конструкций стен зданий до 65–75 °С.

На рис. 6 представлен график модели суточного хода интенсивности солнечной радиации, поступающей на вертикальные и горизонтальные поверхности при безоблачном небе на территориях разных географических широт, которая является определяющим климатическим фактором термического режима энергоактивной деятельной поверхности городов и воздушного купола «острова тепла» над ними.

Установлено, что источником ГОТ является отраженная и излученная солнечная радиация от энергоактивных и энергоаккумулированных искусственных вертикальных и горизонтальных конструктивных поверхностей, которая в сочетании с антропогенными факторами образует температурную оболочку, отличающуюся по свойствам от пригорода.

На рис. 7 приведена карта термического нагрева деятельной поверхности г. Краснодара и его пригородных территорий. Разница температурных показателей достигает от 10 до 30 °С. Выделяются зоны особого нагрева как в самом городе, так и в ближайшем пригороде, что подтверждает концепцию формирования модели «острова тепла» (рис. 8, 9).

Характер воздействия температурного поля на окружающую городскую среду определяется сте-

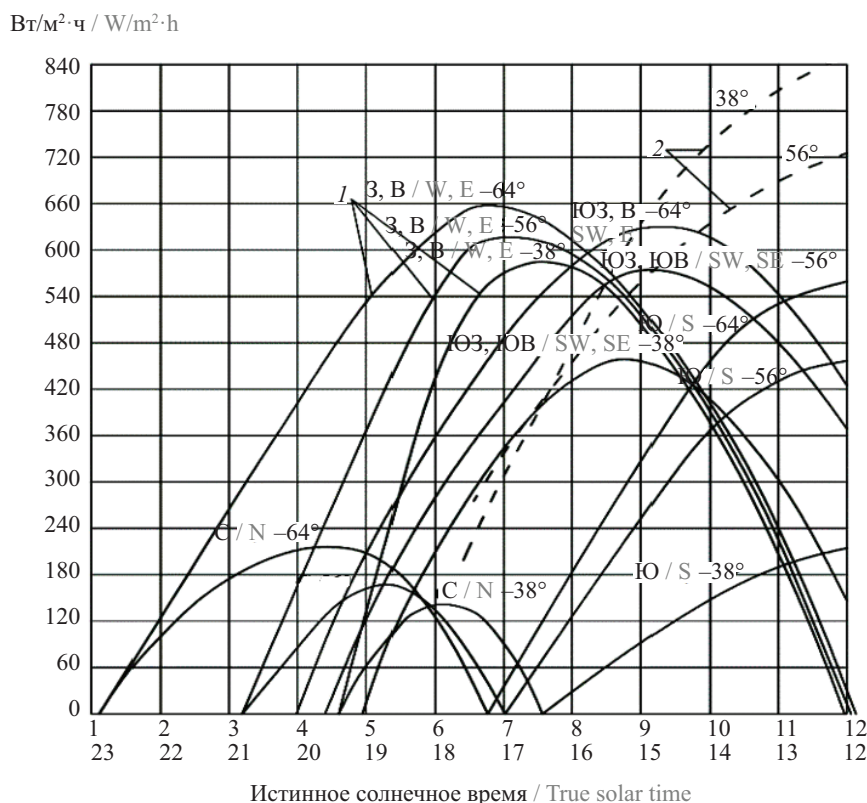


Рис. 6. Модель суточного хода интенсивности солнечной радиации, поступающей на вертикальные (1) и горизонтальные (2) поверхности при безоблачном небе территорий разных географических широт

Fig. 6. Model of daily variations of solar radiation intensity received on vertical (1) and horizontal (2) surfaces under cloudless sky of territories of different geographical latitudes

пению влияния на санитарно-гигиеническое состояние атмосферной среды, а также на тепловой комфорт нахождения человека.

Как правило, в центральной части города формируются максимально высокие температуры и образуется пик «острова тепла», где температура в приземном слое воздуха максимальна за счет нагрева искусственных строительных конструкций и матери-

алов. Наряду с метеорологическими условиями существенное влияние оказывают особенности города, его объемно-планировочное решение, а также направление развития города.

Летние натурные микроклиматические исследования, проведенные на территории южных городов СНГ, таких как Бишкек, Душанбе, Ташкент, Краснодар, Новороссийск и Бука, в летний максимально

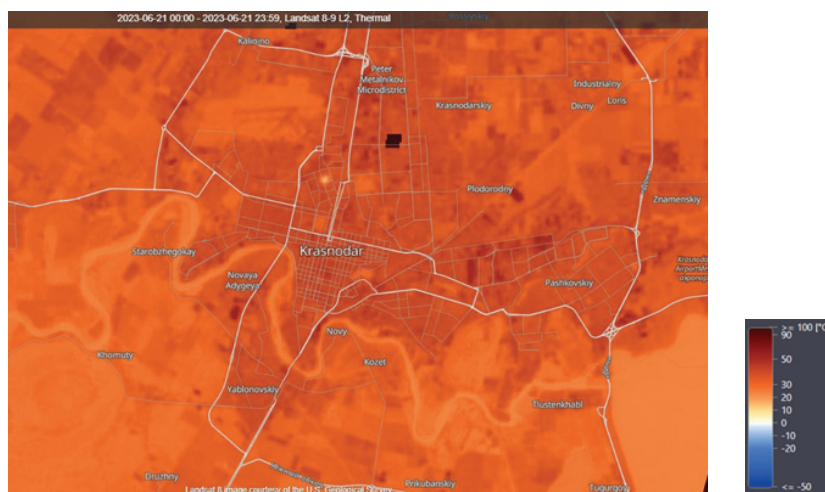
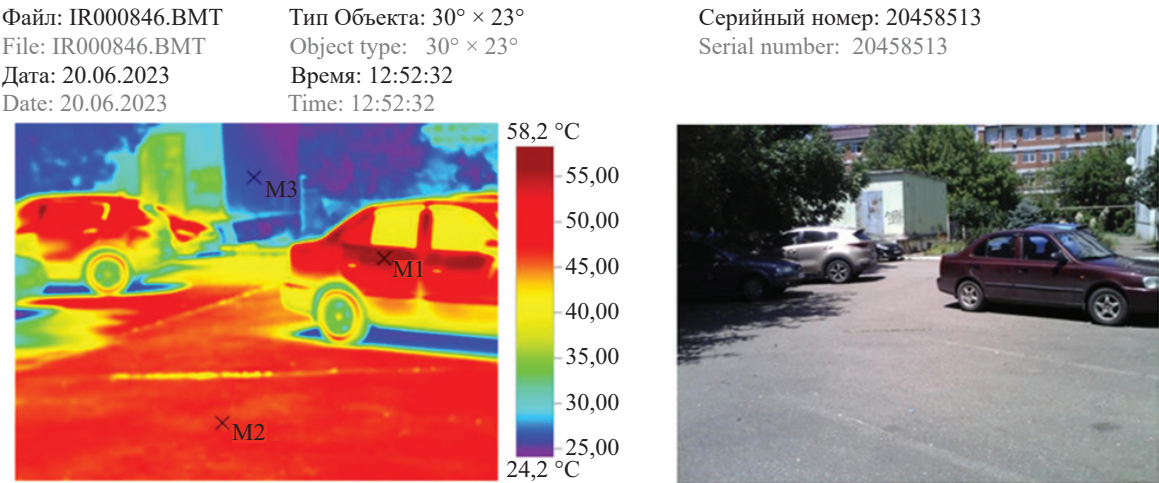


Рис. 7. Карта термического нагрева подстилающей поверхности г. Краснодара (фото со спутника Landsat 8-9 L2, Thermal)

Fig. 7. Map of thermal heating of the underlying surface of the city of Krasnodar (photo from Landsat 8-9 L2, Thermal satellite)



жаркий период показали, что на территории городов с численностью населения до 2 млн чел. и площадью от 5000 до 8000 га прогрев воздуха достигает +46–48 °С внутри города.

Ряд проведенных тепловизионных исследований подтверждает выводы о том, что максимальные температуры наблюдаются на участках застройки с большими площадями асфальтовых покрытий, на неозелененных пешеходных зонах, а также в районах с плотной высотной и многоэтажной застройкой с малой степенью озеленения. На рис. 5, 8, 9 ярко выражен термический нагрев асфальтированных поверхностей, который достигает значительных температурных показателей. К примеру, асфальтовое покрытие парковки для машин в Краснодаре было нагрето до 46,4 °С, при этом автомобиль нагрелся до 57,5 °С. Большие температурные показатели термического нагрева зафиксированы на детской спортивной площадке в г. Новороссийске, где температурный нагрев достиг 62,1 °С, в то время в теневой зоне температурные показатели в разы меньше и достигают 33,9 °С.

Как правило, верхняя граница воздушного купола «острова тепла» возвышается на 100–150 м над центральной частью городов в зонах максимального нагрева подстилающей поверхности застройки, а температура воздуха в приземной зоне нахождения человека достигает до +55 °С и более. Но, если посмотреть по карте термического нагрева на примере Краснодара (рис. 7), можно сделать вывод, что максимально нагретые очаги тепла смещены в восточную часть города, это связано с тем, что город активно развивается в этом направлении и именно здесь расположены новостройки с малой степенью озеленения и большими площадями нагрева. В итоге именно здесь отмечаются максимально активные конвективные потоки, а значит, «остров тепла» будет трансформироваться на восток. Проявляется такая аномалия в течение светового дня и ночью при слабом ветре, а также ясной теплой погоде.

В результате изучения теплового купола над городами выявлены факторы возникновения «острова тепла»:

- высокая интенсивность приходящей суммарной солнечной радиации до 980 Вт/м²;
- повышение степени поглощения коротковолновой радиации, связанной со сложной геометрией городских каньонов;
- способность излучения тепла искусственных горизонтальных и вертикальных покрытий городской морфозастройки до 160–200 Вт/м²;
- большой запас энергии при инсоляции за счет аккумуляции деятельной поверхностью тепла;
- выделение объектами производственно-гражданского назначения тепла техногенного происхождения до 250 Вт/м²;
- снижение тепла на испарения за счет сокращения растительности и водоемов в городах.

При интенсивной инсоляции городской территории происходит нагрев искусственных энергоактив-

ных подстилающих поверхностей городских структур с последующим повышением их энергоемкости, что служит причиной формирования термической конвекции, определяющим фактором создания воздушного купола «острова тепла».

В физических процессах формирования воздушного купола «острова тепла» роль турбулентного потока тепла, зависящая от интенсивности турбулентного перемешивания и стратификации приземного слоя воздуха города, значительна. При этом основным источником городского тепла и его составной частью является солнечная радиация, большая часть которой достигает деятельной поверхности, создавая неустойчивую стратификацию воздуха и контраст между температурой поверхности и прилежащим приземным воздухом. Чем больше этот контраст, тем больше и активнее турбулентный поток.

Турбулентный поток тепла над «островом тепла» по вертикали можно выразить в виде:

$$Q_t = -C_p A \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -C_p k \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -C_p k \left(\frac{\partial T}{\partial Z} + \gamma_a \right), \quad (1)$$

где C_p — удельная теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/(кг·°С); A — коэффициент турбулентного обмена или коэффициент перемещения; $\partial \theta / \partial Z$ — градиент потенциальной температуры; k — коэффициент турбулентности $k = A/\rho$, м²/с (ρ — плотность воздуха кг/м³); γ_a — удельный вес воздуха Н/м³.

В приземном слое воздуха до 100 м над городом коэффициент турбулентности при любых условиях развивается с высотой и зависит от свойства деятельной поверхности города.

Теплоотдача городской морфодетальной поверхности при инсоляции определяется уравнением:

$$Q_r = \bar{\alpha}_r \bar{F}_r \Delta t, \quad (2)$$

где $\bar{\alpha}_r$ — средний коэффициент теплоотдачи морфодетальной поверхности, Вт/м²·°С; $\bar{F}_r$ — усредненная площадь морфодетальной поверхности города, м²; Δt — усредненная разность температур поверхности деятельного слоя города и воздуха над ним, °С.

Тепловой поток от морфодетальной поверхности на приземный слой воздуха при турбулентном течении (критерии $GrPr > 2 \cdot 10^7$ и когда $Nu = 0,135(GrPr)^{1/3}$) определяется уравнением:

$$Q_r \approx a_r^2 \Delta t^{\frac{4}{3}}, \quad (3)$$

где a_r — характерный размер источника тепла городской территории.

Наиболее ярким экологическим следствием эффекта является формирование, смещение и трансформация воздушного купола «острова тепла» со своими климатическими характеристиками ветрового режима пограничного слоя тепловой оболочки городов, что изучалось путем программирования на ЭВМ.

Основная задача программы при составлении — учет ряда метеорологических факторов, таких как разность температуры между морфодетальной поверх-

ностью и слоем приземного воздуха, вертикальная турбулентность атмосферы приземного слоя, основные особенности и параметры «острова тепла» и средняя скорость господствующего ветра.

В таблице сведены результаты, произведенные программным комплексом при расчете двух составляющих: разная скорость ветра и коэффициент турбулентности. Данные таблицы позволяют установить

зависимость высоты пограничного слоя от степени трансформации тепла при разной скорости ветра и определить высоту пограничного слоя. При этом выявлено, что высота пограничного слоя «острова тепла» в процессе его трансформации будет на том уровне, где этот процесс прекратится (рис. 10).

Изучение воздушного теплового купола над «островом тепла» с целью выявления его трансформации

Зависимость высоты пограничного слоя от скорости ветра *U* и коэффициента турбулентности *k*^o

Dependence of the boundary layer height on wind velocity *U* and turbulence coefficient *k*^o

Высота пограничного слоя <i>Z</i> , м Boundary layer height <i>Z</i> , m		Длина <i>X</i> , м Length <i>X</i> , m						
		100	500	1000	2000	3000	4000	5000
Варианты Options	I <i>k</i> ^o = 0,1 м ² /с, <i>U</i> = 1 м/с <i>k</i> ^o = 0.1 м ² /s, <i>U</i> = 1 m/s	17	62	115	195	255	305	355
	II <i>k</i> ^o = 0,15 м ² /с, <i>U</i> = 1 м/с <i>k</i> ^o = 0.15 м ² /s, <i>U</i> = 1 m/s	28	78	138	210	280	330	380
	III <i>k</i> ^o = 0,1 м ² /с, <i>U</i> = 2 м/с <i>k</i> ^o = 0.1 м ² /s, <i>U</i> = 2 m/s	7	25	58	95	170	205	240
	IV <i>k</i> ^o = 0,15 м ² /с, <i>U</i> = 2 м/с <i>k</i> ^o = 0.15 м ² /s, <i>U</i> = 2 m/s	8	37	76	205	190	225	250
	V <i>k</i> ^o = 0,2 м ² /с, <i>U</i> = 2 м/с <i>k</i> ^o = 0.2 м ² /s, <i>U</i> = 2 m/s	10	40	80	205	210	255	265
	VI <i>k</i> ^o = 0,3 м ² /с, <i>U</i> = 2 м/с <i>k</i> ^o = 0.3 м ² /s, <i>U</i> = 2 m/s	15	50	100	165	220	275	325
	VII <i>k</i> ^o = 0,1 м ² /с, <i>U</i> = 5 м/с <i>k</i> ^o = 0.1 м ² /s, <i>U</i> = 5 m/s	3	22	30	45	55	65	67
	VIII <i>k</i> ^o = 0,15 м ² /с, <i>U</i> = 5 м/с <i>k</i> ^o = 0.15 м ² /s, <i>U</i> = 5 m/s	4	26	33	50	70	85	90
	IX <i>k</i> ^o = 0,3 м ² /с, <i>U</i> = 5 м/с <i>k</i> ^o = 0.3 м ² /s, <i>U</i> = 5 m/s	5	30	35	62	95	110	130

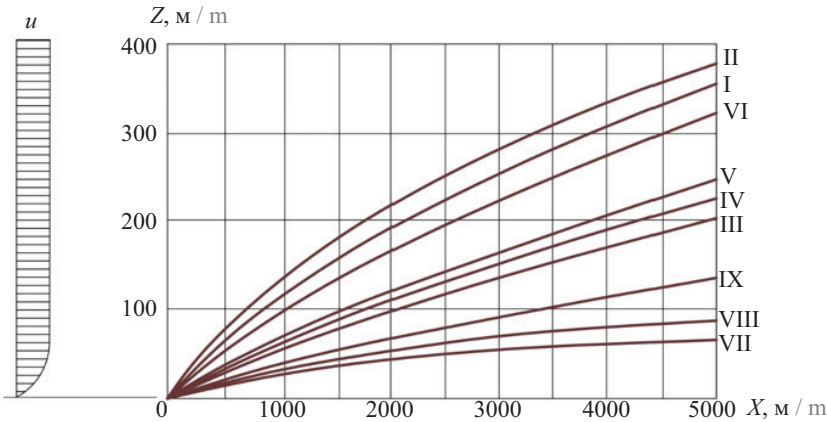


Рис. 10. Модель пограничного слоя «острова тепла» при его трансформации в пространстве

Fig. 10. Model of the boundary layer of the “heat island” during its transformation in space

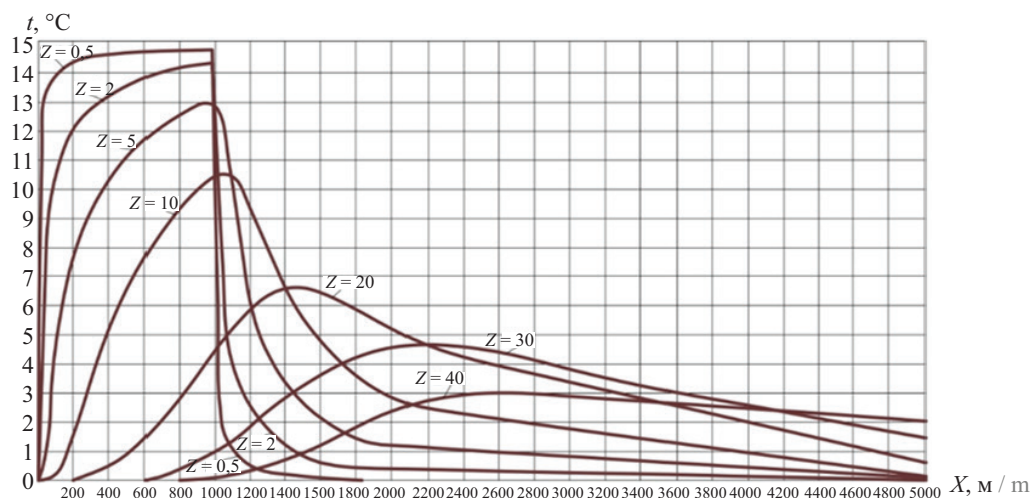


Рис. 11. Модель трансформационных изменений над «островом тепла» при значениях метеорологических параметров: $\Delta t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 2\text{ м/с}$; $k^{\circ} = 0,14\text{ м}^2/\text{с}$; $X_1 = 1000\text{ м}$

Fig. 11. Model of transformational changes over the “heat island” at the value of meteorological parameters: $\Delta t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 2\text{ м/с}$; $k^{\circ} = 0.14\text{ м}^2/\text{с}$; $X_1 = 1,000\text{ м}$

над городом при обтекании ветровым потоком на основе программы ЭВМ позволило составить модель трансформационных изменений над «островом тепла» и его подвижность на расстоянии при различных значениях метеорологических факторов (рис. 11).

Анализ представленных результатов в виде графиков показывает, что траектория воздушной трансформации и пути перемещения воздушного купола «острова тепла» непосредственно зависят от температурных показателей подстилающей поверхности, коэффициента турбулентного обмена, а также скорости вертикальных конвективных потоков и высоты их подъема. При этом купол «острова тепла» растягивается на достаточно большие расстояния и охватывает высокие слои атмосферы, что позволяет прогнозировать траекторию распространения негативных атмосферных примесей и зону их максимальной концентрации на территории города, устанавливать степень распространения, рассеивания промышленных, автотранспортных и других негативных выбросов в городскую среду за пределами города.

Анализ результатов теоретических исследований и расчетов формирования и трансформации тепловой оболочки при помощи компьютерного моделирования показал зависимость качественных и количественных термодинамических и аэродинамических характеристик «острова тепла» и коэффициента турбулентности.

Установлено, что коэффициент турбулентности напрямую влияет на трансформацию купола «острова тепла» в направлении перемещения основного потока ветра. При этом чем больше коэффициент, тем динамичнее трансформация купола по длине X и высоте Z . Стоит отметить, что увеличение характеристик тепловых показателей в зоне «острова тепла» над городом зависит от коэффициента тепловой трансформации воздуха по вертикали и горизонтали. Составленная

теоретическая модель может быть применима для ряда конкретных задач:

- расчета распространения городского «макроострова тепла» на прилегающую территорию в зависимости от метеорологических факторов;
- расчета «микроострова тепла» на территорию городской застройки;
- расчета слияния «островов тепла»;
- оценки формы «острова тепла» и его трансформации;
- расчета распространения и рассеивания вредных от источника выбросов на прилегающую территорию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и инструментальные исследования механизма тепло-ветровых процессов и расчеты, проведенные на модели городского теплового поля программным комплексом, позволили выявить качественную и количественную картину формирования воздушного купола «острова тепла» над городами и степень его трансформации в пространстве при разных условиях ветрового режима. Установлены структурные особенности «острова тепла» городов в теплый период. Составлена модель трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла» с разнообразными морфотипами деятельной поверхности городской инфраструктуры.

Разработанная методика качественной и количественной оценки тепло-ветрового режима модели городского «острова тепла» и ее трансформации на основе программного комплекса позволяет предварительно прогнозировать и производить оценку температурного поля тепловой воздушной оболочки городской среды. При этом появляется возможность учитывать интенсивность условий инсоляции и впо-

следствии уточнять термический режим деятельного слоя городского ландшафта в условиях низких и повышенных скоростей ветра. Последнее в совокупности

с антропогенным тепловым загрязнением определяет биологическое состояние окружающей среды в условиях урбанизированных территорий в теплый период.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Oke T.R. City size and the urban heat island // *Atmospheric Environment* (1967). 1973. Vol. 7. Issue 8. Pp. 769–779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6
2. Bosma C., Hein L. The climate and land use change nexus: implications for designing adaptation and conservation investment strategies in Sub-Saharan Africa // *Sustainable Development*. 2023. Vol. 31. Issue 5. Pp. 3811–3830. DOI: 10.1002/sd.2627
3. Baykara M. An assessment of long-term urban heat island impact on Istanbul's climate // *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2023. Vol. 10. Issue 2. Pp. 40–47. DOI: 10.30897/ijgeo.1230381
4. Huang K., Leng J., Xu Y., Li X., Cai M., Wang R. et al. Facilitating urban climate forecasts in rapidly urbanizing regions with land-use change modeling // *Urban Climate*. 2021. Vol. 36. P. 100806. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100806
5. Rao P., Tassinari P., Torreggiani D. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: a spatio-temporal analysis of remotely sensed data // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 8. P. e18423. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18423
6. Miner M.J., Taylor R.A., Jones C., Phelan P.E. Efficiency, economics, and the urban heat island // *Environment and Urbanization*. 2017. Vol. 29. Issue 1. Pp. 183–194. DOI: 10.1177/0956247816655676
7. Degerli B.C., Cetin M. Evaluation of UTFVI index effect on climate change in terms of urbanization // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Issue 30. Pp. 75273–75280. DOI: 10.1007/s11356-023-27613-x
8. Giannaros C., Agathangelidis I., Papavasileiou G., Galanaki E., Kotroni V., Lagouvardos K. et al. The extreme heat wave of July–August 2021 in the Athens urban area (Greece): Atmospheric and human-biometeorological analysis exploiting ultra-high resolution numerical modeling and the local climate zone framework // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 857. P. 159300. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159300
9. Данилина Н.В., Власов Д.Н. «Здоровый» город как базовая концепция территориального развития // *Экология урбанизированных территорий*. 2020. № 2. С. 112–119. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12112. EDN KDYVWS.
10. Алексеева Л.И., Горлач И.А., Кислов А.В. Вертикальная структура и сезонные особенности «острова тепла» и распределения влажности над Москвой по спутниковым данным // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 8. С. 107–118. EDN EEEYWIE.
11. Гиясов А., Сокольская О.Н. Формирование городской застройки с учетом экологических факторов атмосферной среды в жарких маловетренных и штилевых климатических условиях : монография. Краснодар : ПринтТерра, 2016. 140 с. EDN WLTSOP.
12. Ле М.Т., Бакаева Н.В. Формирование средо-защитных объектов городской среды для условий жаркого и влажного климата // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 9. С. 52–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.52-59. EDN GROODL.
13. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Формирование и особенности «острова тепла» в большом городе // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 370. № 2. С. 249–252. EDN YNRFIR.
14. Мохов И.И. Связь интенсивности «острова тепла» города с его размерами и количеством населения // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 427. № 4. С. 530–533. EDN KPTVAT.
15. Бакаева Н.В., Черняева И.В. Алгоритм оценки градостроительной деятельности на основе принципов биосферной совместимости // *Градостроительство и архитектура*. 2019. Т. 9. № 2 (35). С. 5–14. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.02.1. EDN TAIUHV.
16. Кузнецова И.Н., Бруслова Н.Е., Нахаев М.И. Городской «остров тепла» в Москве: определение, границы, изменчивость // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 5. С. 49–61. EDN YNWCKX.
17. Демин В.И. О роли антропогенных и естественных факторов в оценке городского «острова тепла» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 25–33. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-25-33. EDN QKMWZD.
18. Оленьков В.Д., Бирюков А.Д., Сухоруков В.А. Использование данных дистанционного зондирования земли для построения карты городского «острова тепла» // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : сб. науч. тр. РААСН*. 2020. С. 286–294. EDN JYFGGF.
19. Балдина Е.А., Константинов П., Грищенко М., Варенцов М. Исследование городских «островов тепла» с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне // *Земля из космоса: наиболее эффективные решения*. 2015. № S. С. 38–42. EDN UIQLYF.
20. Faurie C., Varghese B.M., Liu J., Bi P. Association between high temperature and heatwaves with heat-relat-

ed illnesses : a systematic review and meta-analysis // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 852. P. 158332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158332

21. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Conidi A., Argentini S. Measuring the urban heat island of Rome through a dense weather station network and remote sensing imperviousness data // *Urban Climate*. 2023. Vol. 47. P. 101355. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101355

22. Erdem Okumus D., Terzi F. Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: the case of Istanbul // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 73. P. 103128. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103128

23. Meili N., Paschalis A., Manoli G., Fatichi S. Diurnal and seasonal patterns of global urban dry islands // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. Issue 5. P. 054044. DOI: 10.1088/1748-9326/ac68f8

24. Исаков С.В., Шкляев В.А. Определение суммарного влияния антропогенноизменных поверхностей на возникновение эффекта «городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. № 1 (162). С. 178–182. EDN RWUDXJ.

25. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113. Issue 5. Pp. 893–903. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007

26. Khorrami B., Heidarlou H.B., Feizizadeh B. Evaluation of the environmental impacts of urbanization from the viewpoint of increased skin temperatures: a case study from Istanbul, Turkey // *Applied Geomatics*. 2021. Vol. 13. Issue 3. Pp. 311–324. DOI: 10.1007/s12518-020-00350-3

Поступила в редакцию 1 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 5 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 5 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Адхам Иминжанович Гиясов — доктор технических наук, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9800-5187, РИНЦ ID: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru;

Оксана Николаевна Сокольская — кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; SPIN-код: 6999-4101, РИНЦ ID: 781835, ORCID: 0000-0003-4089-3598; ons33@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Oke T.R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967). 1973; 7(8):769-779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6

2. Bosma C., Hein L. The climate and land use change nexus: implications for designing adaptation and conservation investment strategies in Sub-Saharan Africa. *Sustainable Development*. 2023; 31(5):3811-3830. DOI: 10.1002/sd.2627

3. Baykara M. An assessment of long-term urban heat island impact on Istanbul's climate. *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2023; 10(2):40-47. DOI: 10.30897/ijgeo.1230381

4. Huang K., Leng J., Xu Y., Li X., Cai M., Wang R. et al. Facilitating urban climate forecasts in rapidly urbanizing regions with land-use change modeling. *Urban Climate*. 2021; 36:100806. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100806

5. Rao P., Tassinari P., Torreggiani D. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: a spatio-temporal analysis of remotely sensed data. *Heliyon*. 2023; 9(8):e18423. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18423

6. Miner M.J., Taylor R.A., Jones C., Phelan P.E. Efficiency, economics, and the urban heat island. *Environment and Urbanization*. 2017; 29(1):183-194. DOI: 10.1177/0956247816655676

7. Degerli B.C., Cetin M. Evaluation of UTFVI index effect on climate change in terms of urbanization. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30(30):75273-75280. DOI: 10.1007/s11356-023-27613-x

8. Giannaros C., Agathangelidis I., Papavasileiou G., Galanaki E., Kotroni V., Lagouvardos K. et al. The extreme heat wave of July–August 2021 in the Athens urban area (Greece): Atmospheric and human-biometeorological analysis exploiting ultra-high resolution numerical modeling and the local climate zone framework. *Science of The Total Environment*. 2023; 857:159300. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159300

9. Danilina N.V., Vlasov D.N. “Healthy city” as a basic concept for territorial development. *Ecology of Urban Areas*. 2020; 2:112-119. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12112. EDN KDYVWS. (rus.).

10. Alekseeva L.I., Kislov A.V., Gorlach I.A. Vertical structure and seasonal features of the heat island and hu-

midity distribution over moscow derived from satellite data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019; 8:107-118. EDN EEWIE. (rus.).

11. Giyasov A., Sokolskaya O.N. *Formation of urban development taking into account environmental factors of the atmospheric environment in hot, low-wind and calm climatic conditions: monograph*. Krasnodar, Print-Terra, 2016; 140. EDN WLTSOP. (rus.).

12. Le M.T., Bakaeva N.V. The formation of environmental protection objects of the urban environment for hot and humid climate conditions. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 9:52-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.52-59. EDN GROOMDL. (rus.).

13. Matveev L.T., Matveev Yu.L. Formation and specific features of the heat island in a large city. *Doklady Earth Sciences*. 2000; 370(2):249-252. EDN YNRFIR. (rus.).

14. Mokhov I.I. Link of intensity of heat-island effect of a city with its size and population. *Doklady Earth Sciences*. 2009; 427(4):530-533. EDN KPTVAT. (rus.).

15. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. The algorithm of assessment of urban development based on the principles of biospheric compatibility. *Urban Construction and Architecture*. 2019; 9(2):(35):5-14. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.02.1. EDN TAIUHV. (rus.).

16. Kuznetsova I.N., Brusova N.E., Nakhaev M.I. Moscow urban heat island: detection, boundaries, and variability. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017; 5:49-61. EDN YNWCKX. (rus.).

17. Demin V.I. Role of antropogenic and natural drivers in estimation of urban heat island. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019; 16(5):25-33. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-25-33. EDN QKMWZD. (rus.).

18. Olenkov V.D., Biryukov A.D., Sukhorukov V.A. Using Earth Remote Sensing Data to Construct an Urban Heat Island Map. *Fundamental, search and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and*

the construction industry of the Russian Federation in 2019 : collection of scientific works of the RAASN. 2020; 286-294. EDN JYFGGF. (rus.).

19. Baldina E., Konstantinov P., Grishchenko M., Varentsov M. Study of Urban Heat Islands Using Infrared Remote Sensing Data. *Earth from Space*. 2015; S:38-42. EDN UIQLYF. (rus.).

20. Faurie C., Varghese B.M., Liu J., Bi P. Association between high temperature and heatwaves with heat-related illnesses : a systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 2022; 852:158332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158332

21. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Conidi A., Argentini S. Measuring the urban heat island of Rome through a dense weather station network and remote sensing imperviousness data. *Urban Climate*. 2023; 47:101355. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101355

22. Erdem Okumus D., Terzi F. Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: the case of Istanbul. *Sustainable Cities and Society*. 2021; 73:103128. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103128

23. Meili N., Paschalis A., Manoli G., Fatichi S. Diurnal and seasonal patterns of global urban dry islands. *Environmental Research Letters*. 2022; 17(5):054044. DOI: 10.1088/1748-9326/ac68f8

24. Isakov S.V., Shklyayev V.A. Determination of total impact of anthropogenic change surfaces, on the occurrence of the effect of urban heat island with the use of geographic information systems. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2014; 1(162):178-182. EDN RWUDXJ. (rus.).

25. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*. 2009; 113(5):893-903. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007

26. Khorrami B., Heidarlou H.B., Feizizadeh B. Evaluation of the environmental impacts of urbanization from the viewpoint of increased skin temperatures: a case study from Istanbul, Turkey. *Applied Geomatics*. 2021; 13(3):311-324. DOI: 10.1007/s12518-020-00350-3

Received October 1, 2024.

Adopted in revised form on November 5, 2024.

Approved for publication on November 5, 2024.

BIONOTES: **Adham I. Giyazov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9800-5187, ID RSCI: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru;

Oksana N. Sokolskaya — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named after A.V. Titov; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; SPIN-code: 6999-4101, ID RSCI: 781835, ORCID: 0000-0003-4089-3598; ons33@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.23:004.94

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.193-214

Обоснование комбинации стандартных значений характеристик материалов слоев в составе ограждающей конструкции на основе квадратичной оптимизации

Янис Айгарсович Олехнович, Антон Евгеньевич Радаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования определяется особенностями конструктивных и организационно-технологических решений, формируемых в процессе разработки современных строительных проектов, заключающимися в использовании ограниченного состава технологических ресурсов (строительных материалов, машин и оборудования), обуславливающего дискретность значений характеристик вышеупомянутых решений. Цель исследования — разработка инструментальных средств для обоснования комбинации стандартных значений характеристик материалов, используемых для устройства слоев ограждающей конструкции, с применением средств квадратичной оптимизации.

Материалы и методы. Разработаны математические модели оптимизации толщин материалов, используемых в качестве слоев ограждающей конструкции в составе жилого здания, базирующиеся на дискретных и бинарных неизвестных переменных, а также на критериях средневзвешенной (по толщине слоев) температуры, общей толщины и сопротивления теплопередаче конструкции. Математические модели имеют квадратичную структуру целевой функции и линейную структуру нелинейных ограничений, однако наличие ограничений дискретности (бинарности) неизвестных переменных существенно затрудняет процесс реализации моделей ввиду отсутствия подходящих стандартных (доступных в современных программных средах математического моделирования) вычислительных алгоритмов. В этой связи принято решение разработать пользовательский вычислительный алгоритм, заключающий в себе преимущества метода ветвей и границ, используемого для определения оптимальных значений неизвестных переменных, в отношении которых заданы требования дискретности или бинарности, а также метода внутренней точки, применяемого для установления оптимального решения модели квадратичной оптимизации без учета вышеупомянутых требований.

Результаты. Разработанные математические модели реализованы с использованием предложенного вычислительного алгоритма на практическом примере для решения задачи обоснования комбинации стандартных значений характеристик материалов в отношении рассматриваемой ограждающей конструкции. Полученные результаты позволили сформировать зависимости значений отдельных теплотехнических показателей конструкции от требуемого значения ее толщины.

Выводы. На основе анализа результатов реализации разработанных математических моделей с использованием предложенного вычислительного алгоритма на практическом примере сделан вывод о высокой практической значимости вышеупомянутых инструментальных средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многослойное стеновое ограждение, толщина материала, сопротивление теплопередаче, математическая модель, квадратичная оптимизация, метод ветвей и границ, метод внутренней точки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Олехнович Я.А., Радаев А.Е. Обоснование комбинации стандартных значений характеристик материалов слоев в составе ограждающей конструкции на основе квадратичной оптимизации // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 193–214. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.193-214

Автор, ответственный за переписку: Янис Айгарсович Олехнович, olehnovich_yaa@spbstu.ru.

Justification of the combination of standard values of material characteristics of layers in the building envelope on the basis of quadratic optimization

Yanis A. Olekhovich, Anton E. Radaev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the research is determined by the features of the design and organizational-and-technological solutions formed in the process of developing modern construction projects, consisting in the use of a limited composition of technological resources (building materials, machines and equipment), which determines the discreteness of the values of the characteristics of the above-mentioned solutions. The purpose of the study is to develop tools to justify the combination of standard values of the characteristics of materials used for the device of layers of the enclosing structure, using quadratic optimization tools.

Materials and methods. Mathematical models for optimization of the thickness for the materials used as layers of the enclosing structure in a residential building are developed, based on discrete and binary unknown variables, as well as on the criteria of the weighted average (by the thickness of layers) temperature, total thickness and thermal resistance of the structure. The mathematical models have a quadratic structure of the objective function and a linear structure of indirect constraints, but the presence of constraints related to the discreteness (binarity) of unknown variables significantly complicates the process of the models' implementation due to the lack of suitable standard (available in modern software environments for mathematical modelling) computational algorithms. In this regard, it was decided to develop a user computational algorithm that includes the advantages of the branch and bound method used to determine the optimal values of unknown variables for which discreteness or binary requirements are specified, as well as the interior point method used to determine the optimal solution of the quadratic optimization model without taking into account the above requirements.

Results. To practically verify the developed mathematical models, the proposed computational algorithm was applied to justify the selection of standard material characteristics for the given enclosure structure. The resulting data enabled the establishment of dependencies between the thermal performance indicators of the structure and the required thickness of its layers.

Conclusions. Based on the analysis of the results obtained from using the developed mathematical models and computational algorithm, the significant practical value of the proposed tools was confirmed.

KEYWORDS: multilayer wall envelope, material thickness, thermal resistance, mathematical model, quadratic optimization, branch and bound method, interior point method

FOR CITATION: Olekhovich Ya.A., Radaev A.E. Justification of the combination of standard values of material characteristics of layers in the building envelope on the basis of quadratic optimization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):193-214. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.193-214 (rus.).

Corresponding authors: Yanis A. Olekhovich, olekhovich_yaa@spbstu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые на сегодняшний день тенденции к ужесточению требований в отношении временных и стоимостных показателей реализации отечественных строительных проектов обуславливают наличие следующих особенностей процесса строительства:

- использование стандартных конструктивных решений, разрабатываемых на этапе проектирования объекта строительства, посредством анализа ограниченного числа возможных вариантов;
- применение стандартных технологических схем для строительных работ с учетом возможностей организации-застройщика, а также информации, содержащейся в проектной и организационно-технологической документации;
- использование стандартных вариантов технологических ресурсов — строительных материалов, оборудования и машин, характеризующихся серийностью (массовостью) производства, и, как следствие, относительно невысокой себестоимостью.

Вышеперечисленные особенности определяют высокую значимость учета дискретности характеристик конструктивных решений, формируемых в процессе разработки строительных проектов при решении соответствующих прикладных задач, в частности конструктивных решений, применяемых по отношению к стеновым ограждениям в составе объектов жилищного строительства, непосредственно определяющих показатели эффективности соответствующих строительных проектов. Тем не менее результаты предварительного анализа существующих научных

разработок в области обоснования характеристик конструктивных решений для стеновых ограждений в составе объектов строительства засвидетельствовали отсутствие эффективного учета дискретного характера вышеупомянутых характеристик, что, в свою очередь, обуславливает относительно невысокую практическую значимость соответствующих инструментальных средств. Указанное обстоятельство определило целесообразность проведения исследования, цель которого заключается в разработке инструментальных средств для обоснования комбинации стандартных значений характеристик материалов, используемых в качестве слоев ограждающей конструкции в составе жилых зданий, с применением средств квадратичной оптимизации. В рамках исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести обзор и сравнительный анализ научных подходов к обоснованию характеристик конструктивных решений для ограждающих конструкций жилых зданий.
2. Разработать математические модели для обоснования стандартных значений характеристик материалов, используемых в качестве слоев ограждающей конструкции.
3. Реализовать разработанные модели на практическом примере.

Объектом исследования является ограждающая конструкция, содержащая некоторое количество слоев, каждый из которых состоит из однородного материала, (далее — стеновое ограждение) в составе жилого здания. Предмет исследования — физические и теплотех-

нические характеристики материалов, используемых в качестве слоев ограждающей конструкции.

На начальных этапах исследования произведен обзор и сравнительный анализ научных разработок, относящихся по тематике исследования — инструментальных средств (моделей, методик, алгоритмов), предложенных зарубежными и отечественными авторами [1–25]. По результатам выполнения указанной процедуры сделаны следующие выводы:

1. Научные разработки, применяемые для решения задачи обоснования характеристик конструктивных решений, формируемых по отношению к стеновым ограждениям в составе жилых зданий, могут быть классифицированы по основным признакам:

- по объекту анализа: разработки, посвященные анализу отдельных слоев стенового ограждения [14, 18–22, 24, 25]; разработки, предусматривающие анализ комбинаций слоев стенового ограждения [23]; разработки, предполагающие анализ конструктивных решений, формируемых в отношении жилых зданий, в том числе в части соответствующих стеновых ограждений [1–13, 15–17];

- по способу учета требований принадлежности фактических значений расчетных характеристик к ограниченному набору стандартных значений (далее — требований дискретности): разработки, предполагающие неявный учет требований дискретности в рамках процедуры вычисления характеристик объекта анализа посредством округления соответствующих расчетных значений до ближайших стандартных значений с учетом заданных ограничений в отношении показателей энергетической и экономической эффективности жилого здания [14, 18–25]; разработки, предусматривающие непосредственный учет требований дискретности в рамках процедуры вычисления характеристик объекта анализа [1–13, 15–17];

- по разновидности средств математического моделирования, применяемых в рамках процедуры расчета: разработки, предполагающие применение аналитических моделей — формул, выведенных с учетом определенных допущений, для непосредственного расчета характеристик объекта анализа [18, 20, 21, 24, 25]; разработки, предусматривающие создание математических моделей для оптимизации характеристик объекта анализа с последующей реализацией упомянутых моделей с использованием определенных вычислительных алгоритмов [1–17, 19, 22, 23];

- по категории вычислительных алгоритмов, используемых для реализации математических моделей оптимизации: разработки, предполагающие применение детерминированных алгоритмов квадратичной оптимизации [23]; разработки, предусматривающие использование детерминированных алгоритмов целочисленной линейной [14, 19, 22] и нелинейной [5, 6] оптимизации; разработки, в рамках которых рассматривается применение стохастических алгоритмов целочисленной нелинейной оптимизации — алгоритмов роевого интеллекта, а также

генетических алгоритмов [2, 4, 10, 12, 13, 15]; разработки, предусматривающие совместное применение генетических алгоритмов (для реализации моделей оптимизации) и нейронных сетей (для формирования прогнозных зависимостей значений критериев оптимизации от значений неизвестных переменных) [1, 3, 7–9, 11, 16, 17].

2. Основными недостатками, обуславливающими относительно невысокую практическую значимость вышеописанных научных разработок, являются:

- существенная ограниченность состава допустимых вариантов конструктивных решений для рассматриваемого стенового ограждения [20, 21];

- последовательный (основанный на правилах приоритетности) характер учета ограничений для значений показателей энергетической и экономической эффективности в рамках процедуры аналитического (формульного) расчета характеристик конструктивного решения для рассматриваемого стенового ограждения [24, 25];

- трудность обеспечения надлежащего уровня адекватности математических взаимосвязей между значениями критериев оптимизации и значениями неизвестных переменных, обусловленная особенностями применяемых процедур статистической обработки данных [14, 19, 22], а также реализуемых процессов формирования и обучения нейронных сетей [1, 3, 7–9, 11, 16, 17];

- наличие существенных отклонений наиболее предпочтительных значений характеристик конструктивного решения от расчетных значений, полученных посредством округления результатов реализации математической модели без учета требований дискретности до ближайших стандартных значений [14, 18–25];

- относительно невысокая эффективность вычислительного алгоритма, обусловленная наличием большого количества целочисленных переменных [5, 6], а также зависимостью результатов работы алгоритма от начальных значений неизвестных переменных и режимов работы генераторов случайных чисел [1–4, 7–13, 15–17].

Перечисленные выше недостатки имеющихся научных разработок, относящихся к тематике исследования, позволили сделать вывод о необходимости дополнительной научной проработки вопросов учета требований дискретности при обосновании характеристик конструктивных решений для стеновых ограждений в составе жилых зданий, а также определили целесообразность разработки математических моделей обоснования стандартных значений характеристик материалов, используемых для устройства слоев стенового ограждения. Подробное описание моделей представлено в следующем разделе работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанные на промежуточных этапах исследования математические модели обоснования стан-

дартных значений характеристик материалов, используемых для устройства слоев стенового ограждения, базируются на следующих основных положениях:

- 1. Объектом рассмотрения является внешнее (разделяющее внешнюю среду и внутридомовое пространство) многослойное (определяемое совокупностью сопряженных друг с другом слоев) стеновое ограждение в составе жилого здания (рис. 1).
- 2. Каждый отдельный слой в составе рассматриваемого стенового ограждения изготовлен из однородного строительного материала, характеризующегося определенными толщиной и теплопроводностью.
- 3. Для устройства каждого отдельного слоя в составе стенового ограждения используются стандартные варианты (модели) строительных материалов, каждый из которых устанавливается уникальным значением толщины материала слоя.
- 4. Стеновое ограждение предназначено в том числе для обеспечения совместно с другими структурными элементами проектных значений теплотехнических показателей, в частности суммарного сопротивления теплопередаче слоев в составе стенового ограждения.
- 5. Необходимо выявить оптимальную толщину материала каждого отдельного слоя в составе стенового ограждения для обеспечения максимального значения средневзвешенной (по толщине слоев) температуры конструкции при соответствии сопротивления теплопередаче и общей толщины слоев стенового ограждения заданным значениям.

Табл. 1 содержит описание исходных данных и неизвестных переменных, необходимых для построения математических моделей. В табл. 2 приведено описание соответствующих расчетных характеристик.

Математическая модель с дискретными неизвестными переменными (п. 2.1.1 табл. 1) определяется следующими выражениями:

- в обобщенной форме записи:

$\Theta(\{\delta_s\}) \rightarrow \min;$ (1)

$\delta_s \in \{\delta_{sk}\}, s = 1, 2, \dots, S;$ (2)

$\delta(\{\delta_s\}) = \delta_{req};$ (3)

$R^{\min} \leq R(\{\delta_s\}) \leq R^{\max};$ (4)

- в развернутой форме записи:

$\sum_{s=1}^S \left(R_{int} + \sum_{s'=1}^s \frac{\delta_{s'}}{\lambda_{s'}} + \frac{\delta_s}{2 \cdot \lambda_s} \right) \cdot \delta_s \rightarrow \min;$ (5)

$\delta_s \in \{\delta_{sk}\}, s = 1, 2, \dots, S;$ (6)

$\sum_{s=1}^S \delta_s = \delta_{req};$ (7)

$R_{req} \cdot (1 - \sigma_R^{\max}) \leq R_{int} + \sum_{s=1}^S \frac{\delta_s}{\lambda_s} + R_{ext} \leq R_{req} \cdot (1 + \sigma_R^{\max}).$ (8)

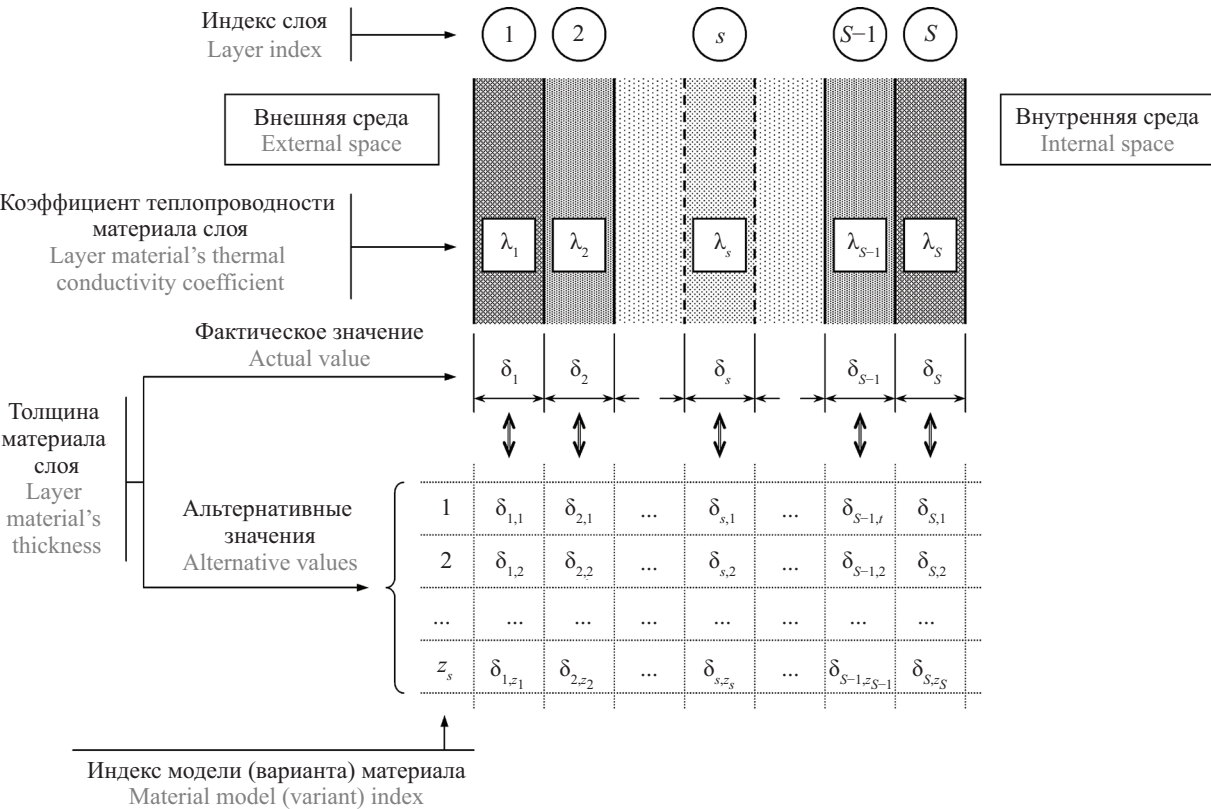


Рис. 1. Схематическое описание рассматриваемого стенового ограждения

Fig. 1. Schematic description of the considered wall envelope

Табл. 1. Исходные данные и неизвестные переменные, необходимые для построения математических моделей
Table 1. Initial data and unknown variables required for creation of mathematical models

Номер Number	Наименование элемента исходных данных/категории неизвестных переменных Name of source data element/category of unknown variables	Единица измерения Measure unit	Обозначение/ выражение Designation/ expression
1	Исходные данные Source data		
1.1	Агрегированные исходные данные Aggregated source data		
1.1.1	Общее количество слоев в составе стенового ограждения Total number of layers within the wall envelope	ед. unit	S
1.1.2	Сопrotивление теплопередаче стенового ограждения Thermal resistance of the wall envelope	на внутренней поверхности on the inner surface	$m^2 \cdot ^\circ C / Bt$ $m^2 \cdot ^\circ C / W$ R_{int}
1.1.3		на внешней поверхности on the outer surface	$m^2 \cdot ^\circ C / Bt$ $m^2 \cdot ^\circ C / W$ R_{ext}
1.1.4	Требуемое значение толщины стенового ограждения Required value of the thickness for the wall envelope	м m	δ_{req}
1.1.5	Требуемое значение сопротивления теплопередаче стенового ограждения Required value of thermal resistance for the wall envelope	$m^2 \cdot ^\circ C / Bt$ $m^2 \cdot ^\circ C / W$	R_{req}
1.1.6	Максимальное относительное отклонение фактического значения сопротивления теплопередаче стенового ограждения от требуемого значения Maximum relative deviation of the wall envelope's thermal resistance actual value from the required value	—	σ_R^{max}
1.1.7	Температура внутреннего воздуха Indoor air temperature	$^\circ C$	t_{int}
1.1.8	Температура наружного воздуха Outdoor air temperature	$^\circ C$	t_{ext}
1.1.9	Коэффициент, учитывающий неравномерность материала стенового ограждения Coefficient taking into account the non-uniformity of the material of the wall envelope	—	r
1.2	Индексы Indexes		
1.2.1	Индекс слоя стенового ограждения* Wall envelope's layer index*	—	$s = 1, 2, ..., S$
1.2.2	Индекс альтернативного (стандартного) значения толщины материала слоя стенового ограждения** Index of alternative (standard) value of the thickness for the material within the layer of the wall envelope**	—	$k = 1, 2, ..., z_s$
1.3	Исходные данные, задаваемые для каждого слоя с индексом s ($s = 1, 2, ..., S$) в составе стенового ограждения Initial data specified for each layer with an index s ($s = 1, 2, ..., S$) as part of the wall envelope		
1.3.1	Наименование материала, используемого в качестве слоя Name of the material used as layer	—	—
1.3.2	Количество альтернативных (стандартных) значений толщины материала, используемого в качестве слоя The number of alternative (standard) values of thickness for the material used as layer	ед. unit	z_s
1.3.3	Коэффициент теплопроводности материала, используемого в качестве слоя Thermal conductivity coefficient of the material used as layer	$Bt/(m \cdot ^\circ C)$ $W/(m \cdot ^\circ C)$	λ_s
1.4	Исходные данные, задаваемые для каждого альтернативного значения с индексом k ($k = 1, 2, ..., z_s$) толщины материала в рамках каждого слоя с индексом s ($s = 1, 2, ..., S$) в составе стенового ограждения Initial data specified for each alternative value with an index k ($k = 1, 2, ..., z_s$) for the thickness of the material within each layer with an index s ($s = 1, 2, ..., S$) as part of the wall envelope		

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер Number	Наименование элемента исходных данных/категории неизвестных переменных Name of source data element/category of unknown variables	Единица измерения Measure unit	Обозначение/ выражение Designation/ expression
1.4.1	Альтернативное (стандартное) значение толщины материала, используемого в качестве слоя** Alternative (standard) value for the thickness of the material used as layer**	м m	δ_{sk}
2	Неизвестные переменные Unknown variables		
2.1	Неизвестные переменные, учитываемые для каждого слоя с индексом s ($s = 1, 2, \dots, S$) в составе стенового ограждения Unknown variables taken into account for each layer with index s ($s = 1, 2, \dots, S$) as part of the wall envelope		
2.1.1	Фактическое значение толщины материала, используемого в качестве слоя Actual value for the thickness of the of the material used as layer	м m	δ_s
2.2	Неизвестные переменные, учитываемые для каждого альтернативного значения с индексом k ($k = 1, 2, \dots, z_s$) толщины материала в рамках каждого слоя с индексом s ($s = 1, 2, \dots, S$) в составе стенового ограждения Unknown variables taken into account for each alternative value with an index k ($k = 1, 2, \dots, z_s$) for the thickness of the material within each layer with an index s ($s = 1, 2, \dots, S$) as part of the wall envelope		
2.2.1	Индикатор соответствия фактического значения толщины слоя альтернативному значению*** Indicator describing compliance of the layer thickness's actual value with alternative value***	—	y_{sk}

Примечание: * — индексация слоев ограждающей конструкции производится по принципу: возрастание значений индекса соответствует направлению устройства слоев от внутренней среды (относительно стенового ограждения) к внешней среде; ** — значения элемента исходных данных должны удовлетворять условию $\delta_{sk=1} < \delta_{sk=2} < \dots < \delta_{sk=zs}$; *** — каждая неизвестная переменная данной категории является бинарной ($y_{sk} \in \{0; 1\}$) и формируется по следующему принципу: $y_{sk} = 1$ в случае, если фактическое значение толщины материала, используемого в качестве слоя с индексом s в составе стенового ограждения, соответствует альтернативному (стандартному) значению с индексом k ; в противном случае $y_{sk} = 0$.

Note: * — indexing of layers within the enclosing structure is carried out according to the principle: increasing index values correspond to the direction of the arrangement of layers from the internal environment (relative to the wall envelope) to the external environment; ** — the values of the source data element must satisfy the condition $\delta_{sk=1} < \delta_{sk=2} < \dots < \delta_{sk=zs}$; *** — each unknown variable of this category is binary ($y_{sk} \in \{0; 1\}$) and is formed in accordance with the following principle: if $y_{sk} = 1$ the actual value for the thickness of the material used as the layer with index s as part of the wall envelope corresponds to the alternative (standard) value with the index k ; otherwise $y_{sk} = 0$.

Табл. 2. Расчетные характеристики, учитываемые в рамках математических моделей

Table 2. Calculated characteristics taken into account within mathematical models

Номер Number	Наименование расчетной характеристики Name of calculated characteristic	Единица измерения Measure unit	Выражение Expression
1	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого слоя с индексом s ($s = 1, 2, \dots, S$) в составе стенового ограждения Calculated characteristics enumerated for each layer with index s ($s = 1, 2, \dots, S$) within wall envelope		
1.1	Предельно допустимое значение толщины материала, используемого в качестве слоя Limit value of the thickness for the material used as layer	минимальное minimal	$\delta_s^{\min} = \min_k \{ \delta_{sk} \}$
1.2		максимальное maximal	$\delta_s^{\max} = \max_k \{ \delta_{sk} \}$
1.3	Сопротивление теплопередаче на внутренней поверхности слоя Thermal resistance on the inner surface of the layer	определяемое переменными п. 2.1.1 табл. 1 determined by the variables of item 2.1.1 of Table 1	$R_{int s} = \begin{cases} R_{int}, & s = 1; \\ R_{int} + \sum_{s'=1}^{s-1} \frac{\delta_{s'}}{\lambda_{s'}}, & s > 1 \end{cases}$

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Номер Number	Наименование расчетной характеристики Name of calculated characteristic		Единица измерения Measure unit	Выражение Expression
1.4	Сопrotивление теплопередаче на внутренней поверхности слоя Thermal resistance on the inner surface of the layer	определяемое переменными п. 2.2.1 табл. 1 determined by the variables of item 2.2.1 of Table 1	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$R_{int\ s} = \begin{cases} R_{int}, s = 1; \\ R_{int} + \sum_{s'=1}^{s-1} \frac{\sum_{k=1}^{z_s} \delta_{s'k} \cdot y_{s'k}}{\lambda_{s'}}, s > 1 \end{cases}$
1.5	Сопrotивление теплопередаче на внешней поверхности слоя Thermal resistance on the outer surface of the layer	определяемое переменными п. 2.1.1 табл. 1 determined by the variables of item 2.1.1 of Table 1	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$R_{ext\ s} = R_{int} + \sum_{s=1}^s \frac{\delta_s}{\lambda_s}$
1.6		определяемое переменными п. 2.2.1 табл. 1 determined by the variables of item 2.2.1 of Table 1	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$R_{ext\ s} = R_{int} + \sum_{s'=1}^s \frac{\sum_{k=1}^{z_s} \delta_{s'k} \cdot y_{s'k}}{\lambda_{s'}}$
1.7	Среднее в слое сопротивление теплопередаче Average thermal resistance in a layer		$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$R_s = \frac{R_{int\ s} + R_{ext\ s}}{2}$
1.8	Количество альтернативных (стандартных) значений толщины материала слоя, соответствующих фактическому значению Number of layer material thickness's alternative (standard) values corresponding to the actual value		ед. unit	$y_s = \sum_{k=1}^{z_s} y_{sk}$
2	Агрегированные расчетные характеристики Aggregated calculated characteristics			
2.1	Предельно допустимое значение сопротивления теплопередаче стенового ограждения Limit value of thermal resistance of the wall envelope	минимальное minimal	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$R^{\min} = R_{req} \cdot (1 - \sigma_R^{\max})$
2.2		максимальное maximal	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$R^{\max} = R_{req} \cdot (1 + \sigma_R^{\max})$
2.3	Фактическое значение толщины стенового ограждения Actual value of the wall envelope's thickness	определяемое переменными п. 2.1.1 табл. 1 determined by the variables of item 2.1.1 of Table 1	м m	$\delta = \sum_{s=1}^S \delta_s$
2.4		определяемое переменными п. 2.2.1 табл. 1 determined by the variables of item 2.2.1 of Table 1	м m	$\delta = \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{z_s} \delta_{sk} \cdot y_{sk}$
2.5	Фактическое значение сопротивления теплопередаче стенового ограждения Actual value of the wall envelope's thermal resistance		$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$R = R_{ext\ s=S} + R_{ext}$
2.6	Относительное отклонение фактического значения сопротивления теплопередаче стенового ограждения от требуемого значения Relative deviation of the wall envelope's thermal resistance actual value from the required value		—	$\sigma_R = \frac{R - R_{req}}{R_{req}}$
2.7	Интегральный показатель сопротивления теплопередаче стенового ограждения Integral indicator of the wall envelope's thermal resistance		$\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ $\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	$\Theta = \sum_{s=1}^S R_s \cdot \delta_s$

Номер Number	Наименование расчетной характеристики Name of calculated characteristic	Единица измерения Measure unit	Выражение Expression
2.8	Средневзвешенная (по толщине слоев) температура стенового ограждения* Weighted average (by the thickness of layers) temperature of the wall envelope*	°C	$\bar{t} = t_{int} - \frac{t_{int} - t_{ext}}{R} \cdot r \cdot \frac{\Theta}{\delta}$

Примечание: * — расчетная характеристика непосредственно не учитывается в структуре математических моделей и вычисляется на основе результатов их реализации в рамках процедуры оценки качества получаемого решения.
Note: * — the calculated characteristic is not directly taken into account in the structure of mathematical models and is calculated on the basis of the results of their implementation within the procedure of the quality assessment for the obtained solution.

Математическая модель с бинарными неизвестными переменными (п. 2.2.1 табл. 1) определяется следующими выражениями:

• в обобщенной форме записи:

$$\Theta(\{y_{sk}\}) \rightarrow \max; \tag{9}$$
$$y_{sk} \in \{0; 1\}, s = 1, 2, \dots, S; k = 1, 2, \dots, z_s; \tag{10}$$
$$y_s(\{y_{sk}\}) = 1, s = 1, 2, \dots, S; \tag{11}$$
$$\delta(\{y_{sk}\}) = \delta_{req}; \tag{12}$$
$$R^{\min} \leq R(\{y_{sk}\}) \leq R^{\max}; \tag{13}$$

• в развернутой форме записи:

$$\sum_{s=1}^S \left(R_{int} + \sum_{s'=1}^{s-1} \frac{\sum_{k=1}^{z_{s'}} \delta_{s'k} \cdot y_{s'k}}{\lambda_{s'}} + \frac{\sum_{k=1}^{z_s} \delta_{sk} \cdot y_{sk}}{2 \cdot \lambda_s} \right) \times$$
$$\times \sum_{k=1}^{z_s} \delta_{sk} \cdot y_{sk} \rightarrow \min; \tag{14}$$
$$y_{sk} \in \{0; 1\}, s = 1, 2, \dots, S; k = 1, 2, \dots, z_s; \tag{15}$$
$$\sum_{k=1}^{z_s} y_{sk} = 1, s = 1, 2, \dots, S; \tag{16}$$
$$\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{z_s} \delta_{sk} \cdot y_{sk} = \delta_{req}; \tag{17}$$
$$R_{req} \cdot (1 - \sigma_R^{\max}) \leq R_{int} + \sum_{s=1}^S \frac{\sum_{k=1}^{z_s} \delta_{sk} \cdot y_{sk}}{\lambda_s} + \tag{18}$$
$$+ R_{ext} \leq R_{req} \cdot (1 + \sigma_R^{\max}).$$

Описание структурных элементов математических моделей представлено в табл. 3.

Важно отметить, что выражения (14), (17), (18) получены на основе соответственно выражений (5), (7), (8) посредством замены дискретных переменных $\{\delta_s\}$ на бинарные переменные $\{y_{sk}\}$ согласно выражению:

$$\delta_s = \sum_{k=1}^{z_s} \delta_{sk} \cdot y_{sk}; s = 1, 2, \dots, S. \tag{19}$$

Как видно из выражений (5)–(8), (14)–(18), каждая из представленных математических моделей описывается квадратичной (относительно неизвестных переменных) структурой целевой функции, а также линейной структурой непрямых ограничений. Тем не менее

наличие в структуре математической модели, определяемой выражениями (5)–(8), прямых ограничений, исключающих непрерывный характер значений неизвестных переменных (выражение (6)), исключает возможность применения для реализации модели с дискретными неизвестными переменными стандартных вычислительных алгоритмов, доступных в современных программных средах математического моделирования; при этом наличие в структуре математической модели, определяемой выражениями (14)–(18), аналогичных прямых ограничений (выражение (15)) обуславливает трудность эффективной реализации модели с бинарными неизвестными переменными с использованием стандартных вычислительных алгоритмов, к которым относятся следующие:

- детерминированные алгоритмы нелинейной целочисленной оптимизации, каждый из которых предполагает совместное применение метода ветвей и границ и определенного метода нелинейной оптимизации при произвольной структуре целевой функции, обладающей свойством дифференцируемости¹;
- стохастические алгоритмы нелинейной целочисленной оптимизации, соответствующие эвристическим методам эволюционного развития [26].

Указанное обстоятельство определило целесообразность разработки специального вычислительного алгоритма, заключающего в себе преимущества метода ветвей и границ, используемого для определения оптимальных значений неизвестных переменных, в отношении которых заданы ограничения (требования) дискретности или бинарности, а также метода внутренней точки, применяемого для определения оптимального решения модели квадратичной оптимизации без учета ограничений (требований) дискретности или бинарности значений неизвестных переменных.

Структура разработанного вычислительного алгоритма, обеспечивающего реализацию математических моделей обоснования стандартных значений характеристик материалов, используемых для устройства слоев стенового ограждения, представлена на рис. 2. Основными особенностями вышеупомянутого вычислительного алгоритма, применяемого по отношению

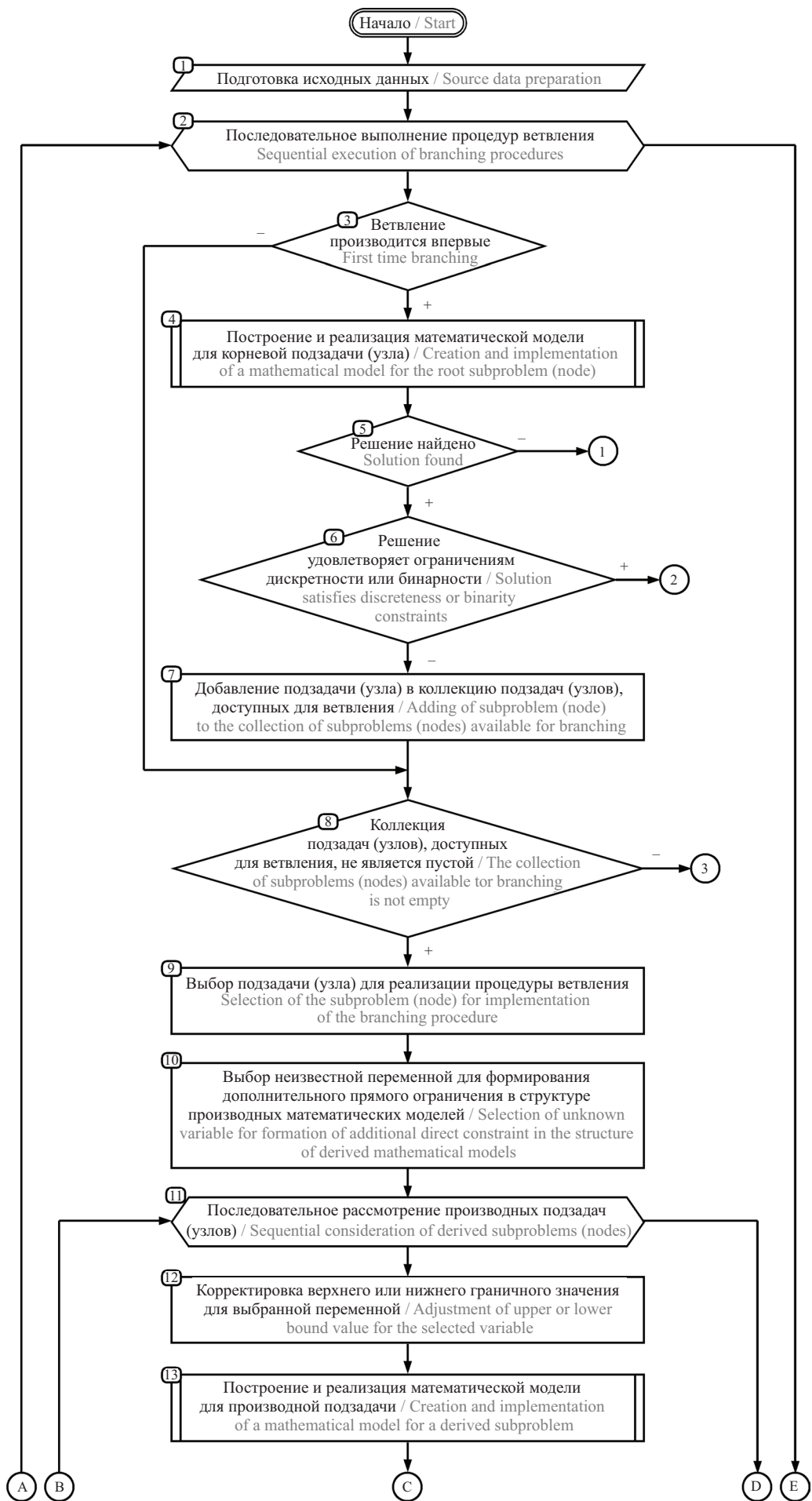
¹ Solver Technology — Mixed-Integer and Constraint Programming / Frontline Systems, Inc. 2024. URL: <https://www.solver.com/mixed-integer-constraint-technology>

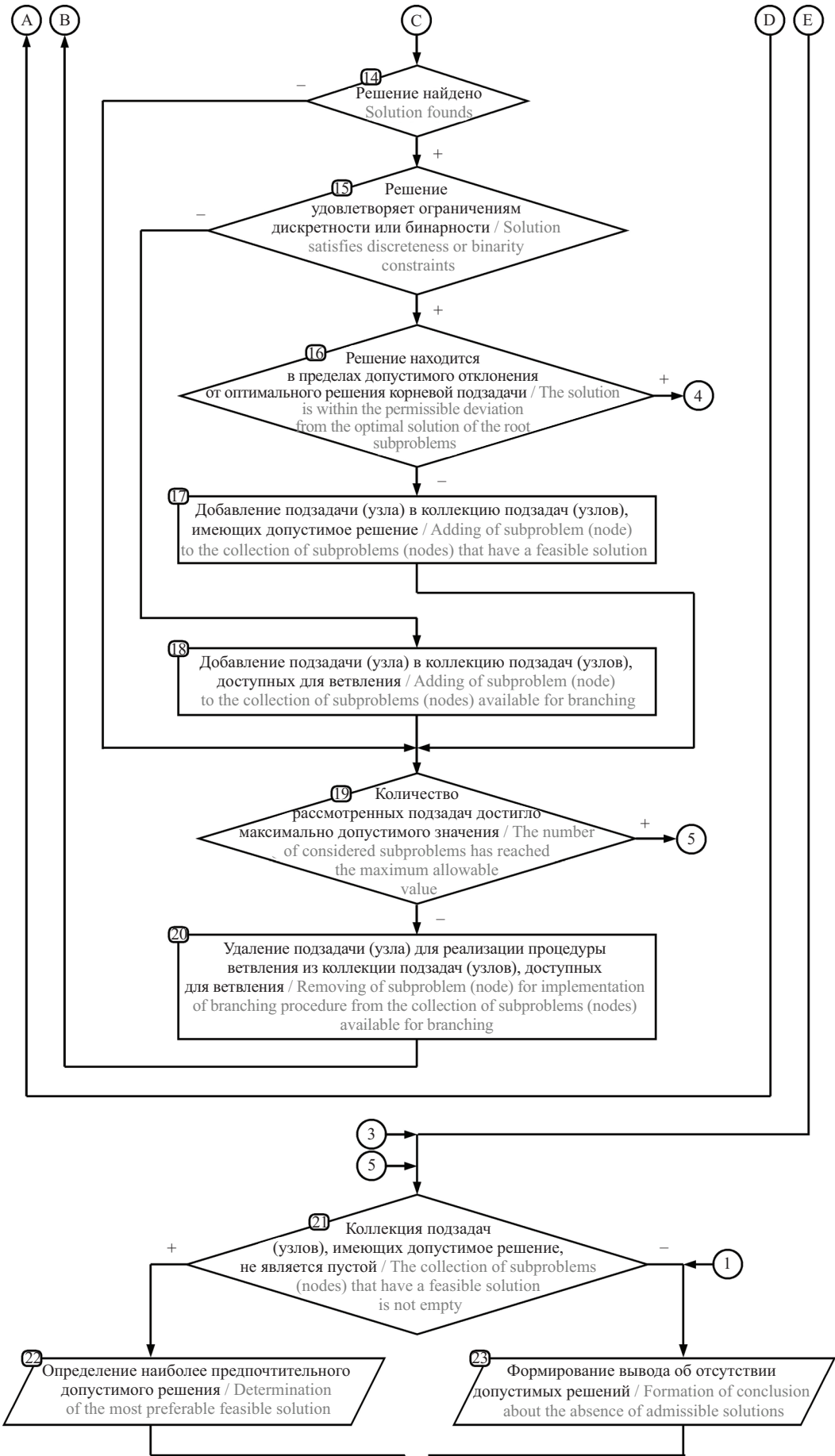
Табл. 3. Описание структурных элементов математических моделей

Table 3. Description of the structural elements of the mathematical models

Номер выражения как структурного элемента модели Number of expression as a structural element of the model				Описание Description
модель с дискретными переменными model with discrete variables		модель с бинарными переменными model with binary variables		
обобщенная форма записи generalized notation	развернутая форма записи extended notation	обобщенная форма записи generalized notation	развернутая форма записи extended notation	
1	5	9	14	Целевая функция, предполагающая минимизацию интегрального показателя сопротивления теплопередаче стенового ограждения (числитель вычитаемого в выражении для средневзвешенной температуры стенового ограждения) Objective function, which assumes the minimization of integral indicator of the wall envelope’s thermal resistance (numerator of the subtrahend in the expression for the wall envelope’s weighted average temperature)
2	6	–	–	Прямые ограничения, определяющие дискретность (принадлежность к ограниченному набору стандартных значений) значения каждой из неизвестных переменных (толщины материала слоя стенового ограждения) Direct constraints that determine the discreteness (belonging to a limited set of standard values) of the each unknown variable’s value (thickness of the material within the wall envelope)
–	–	10	15	Прямые ограничения, определяющие бинарность (соответствие либо нулю, либо единице) значения каждой из неизвестных переменных (толщины материала слоя стенового ограждения) Direct constraints that determine the binarity (correspondence to either zero or one) of the each unknown variable’s value (thickness of the material within the wall envelope)
–	–	11	16	Непрямые ограничения, определяющие соответствие фактического значения толщины материала в составе каждого отдельного слоя стенового ограждения единственному из альтернативных (стандартных) значений для упомянутого слоя Indirect constraints that determine the correspondence of the actual value of the thickness for the material within each individual layer of the wall envelope to the only one of the alternative (standard) values for the mentioned-above layer
3	7	12	17	Непрямое ограничение, определяющее соответствие фактического значения толщины стенового ограждения требуемому значению Indirect constraint that determines correspondence of the actual value of the wall envelope’s thickness to the required value
4	8	13	18	Непрямое ограничение, определяющее нахождение фактического значения сопротивления теплопередаче стенового ограждения в пределах допустимого отклонения от требуемого значения Indirect constraint that determines the location of actual value of the wall envelope’s thermal resistance within the permissible deviation from the required value

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 2, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 2, 2025





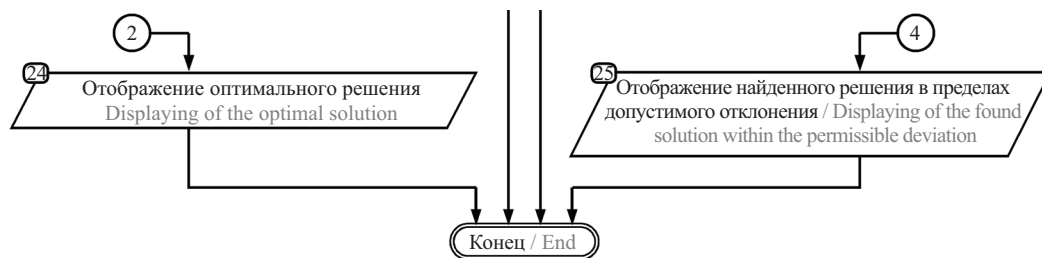


Рис. 2. Блок-схема, описывающая структуру разработанного алгоритма реализации математических моделей

Fig. 2. Block diagram describing the structure of the developed algorithm for implementation of mathematical models

к каждой из разработанных математических моделей, являются следующие:

1. Реализация в рамках корневой подзадачи производной математической модели (блок 2 схемы на рис. 2) без учета ограничений, исключающих непрерывный характер значений неизвестных переменных. Вышеупомянутая производная математическая модель определяется следующими выражениями:

• в случае наличия в исходной модели требований дискретности — выражениями (5), (7), (8), а также выражением:

$$\delta_s^{\min} \leq \delta_s \leq \delta_s^{\max}, s = 1, 2, \dots, S, \quad (20)$$

определяющим прямые ограничения для непрерывных переменных;

• в случае наличия в исходной модели требований бинарности — выражениями (14), (16), (17), (18).

2. Реализация каждой из производных математических моделей в составе соответствующих подзадач (блоки 2 и 13 схемы на рис. 2) с использованием метода внутренней точки, предполагающего формирование системы уравнений, описывающей условия Куна – Таккера, и последующее ее решение с использованием алгоритмов прогноза и коррекции.

3. Выполнение процедуры выбора подзадачи для реализации очередной процедуры ветвления подзадач (блок 9 схемы на рис. 2) согласно выражению:

$$t^* : UB_{t^*} = \min_{t \in T^{sf}} \{UB_t\}, \quad (21)$$

где t, t^* — индекс текущей и наиболее предпочтительной производной подзадачи (узла) соответственно; T^{sf} — множество индексов, доступных для ветвления производных подзадач, в рамках каждой из которых получено оптимальное решение, не удовлетворяющее ограничениям дискретности или бинарности.

4. Выполнение процедуры выбора переменной в рамках оптимального решения выбранной подзадачи для реализации процедуры ветвления (блок 10 схемы на рис. 2) в соответствии с выражением:

• в случае наличия в исходной модели требований дискретности:

$$v^* : \xi_{v^*} = \max_{v \in V^{nd}} \{\xi_v\} = \max_{v \in V^{nd}} \left\{ \frac{\min(x_v - \delta_{s=v, k_v^*}, \delta_{s=v, k_v^*+1} - x_v)}{x_v} \right\}, \quad (22)$$

где v, v^* — индекс текущей и наиболее предпочтительной для реализации ветвления неизвестной переменной соответственно; ξ_{v^*}, ξ_v — значение относительного показателя недискретности для текущей и наиболее предпочтительной для реализации ветвления неизвестной переменной соответственно; V^{nd} — множество индексов неизвестных переменных, значения которых для оптимального решения, найденного в процессе реализации математической модели производной подзадачи (выбранной для выполнения процедуры ветвления), не удовлетворяют ограничениям дискретности/бинарности; x_v — значение текущей переменной в оптимальном решении, найденном в процессе реализации математической модели производной подзадачи, выбранной для выполнения процедуры ветвления; k_v^* — значение индекса интервала между смежными альтернативными значениями толщины слоя (дискретными значениями переменной), в пределах которого находится значение переменной x_v ;

$$k_v^* : \delta_{s=v, k_v^*} < x_v < \delta_{s=v, k_v^*+1}; \quad (23)$$

$$k_v^* \in \{1; 2; \dots; z_{s=v} - 1\}; \quad (24)$$

• в случае наличия в исходной модели требований бинарности:

$$v^* : \Delta_{v^*} = \max_{v \in V^{nd}} \{\Delta_v\} = \max_{v \in V^{nd}} \{\min(x_v, 1 - x_v)\}, \quad (25)$$

где Δ_{v^*}, Δ_v — значение абсолютного показателя небинарности для текущей и наиболее предпочтительной для реализации ветвления неизвестной переменной соответственно.

5. Выполнение процедур корректировки верхнего и нижнего граничного значения для неизвестной переменной, выбранной для ветвления (блок 12 схемы на рис. 2), в соответствии с выражениями:

• в случае наличия в исходной модели требований дискретности:

$$x_{v^*}^{\max} = \delta_{s=v^*, k_{v^*}^*}; \quad (26)$$

$$x_{v^*}^{\min} = \delta_{s=v^*, k_{v^*}^*+1}, \quad (27)$$

где $x_{v^*}^{\max}, x_{v^*}^{\min}$ — соответственно верхнее и нижнее граничное значение неизвестной переменной, выбранной для ветвления;

• в случае наличия в исходной модели требования бинарности:

$$x_{v^*}^{\max} = 0;$$
(28)

$$x_{v^*}^{\min} = 1.$$
(29)

6. Остановка алгоритма в случае нахождения для производной математической модели текущей подзадачи оптимального решения, удовлетворяющего требованиям дискретности или бинарности, обеспечивающего нахождение соответствующего значения целевой функции в пределах допустимого отклонения от значения целевой функции, соответствующего оптимальному решению для производной математической модели корневой подзадачи (блок 16 схемы на рис. 2), согласно выражению (основному условию остановки алгоритма):

$$\frac{UB_t - LB}{UB_t} \leq \psi^{\max},$$
(30)

где UB_t — значение целевой функции, соответствующее оптимальному значению производной математической модели текущей подзадачи с индексом t , удовлетворяющему требованиям дискретности или бинарности; LB — значение целевой функции,

соответствующее оптимальному решению производной математической модели корневой подзадачи; $\psi^{\max}$ — задаваемое максимально допустимое значение показателя вышеупомянутого относительного отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На заключительных этапах исследования для объективной оценки практической значимости разработанных математических моделей была произведена их реализация на практическом примере для решения задачи обоснования комбинации стандартных значений характеристик материалов, используемых для устройства слоев стенового ограждения — плиточного фасада по железобетонному основанию. Значения элементов исходных данных, используемые при реализации математических моделей, приведены в табл. 4, а также строках 1–13 табл. 5.

Реализация каждой из математических моделей (см. выражения (5)–(8), (14)–(18)) осуществлялась с помощью разработанного вычислительного алгоритма (см. рис. 2) и включала проведение серии экспериментов. Эти эксперименты выполнялись с варьированием значения требуемой толщины стенового ограждения (п. 1.1.4 табл. 1) от 0,221 м (сумма ми-

Табл. 4. Значения элементов агрегированных исходных данных, используемые в процессе реализации математических моделей на практическом примере

Table 4. Values of aggregated source data elements used for implementation of the mathematical models on practical example

Номер Number	Наименование элемента исходных данных Name of source data element	Обозначение Designation	Единица измерения Measure unit	Значение Value
1	Общее количество слоев в составе стенового ограждения Total number of layers within the wall envelope	S	ед. unit	5
2	Сопrotивление теплопередаче на внутренней поверхности стенового ограждения Thermal resistance on the inner surface of the wall envelope	R_{int}	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$	0,115
3	Сопrotивление теплопередаче на внешней поверхности стенового ограждения Thermal resistance on the outer surface of the wall envelope	R_{ext}	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$	0,043
4	Требуемое значение толщины стенового ограждения Required value of the thickness for the wall envelope	δ_{req}	м m	2,988
5	Требуемое значение сопrotивления теплопередаче стенового ограждения Required value of thermal resistance for the wall envelope	R_{req}	$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ $\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$	0,01
6	Максимальное относительное отклонение фактического значения сопrotивления теплопередаче стенового ограждения от требуемого значения Maximum relative deviation of the wall envelope's thermal resistance actual value from the required value	$\sigma_R^{\max}$	—	20
7	Температура внутреннего воздуха Indoor air temperature	t_{int}	°C	–1,3
8	Температура наружного воздуха Outdoor air temperature	t_{ext}	°C	0,115
9	Коэффициент, учитывающий неравномерность материала стенового ограждения Coefficient taking into account the non-uniformity of the material of the wall envelope	r	—	0,92

Табл. 5. Значения элементов исходных данных в разрезе отдельных слоев стенового ограждения, используемые в процессе реализации математических моделей на практическом примере

Table 5. Values of source data elements related to certain layers of the wall envelope, used for implementation of the mathematical models on practical example

Номер Number	Наименование элемента исходных данных/результата реализации модели Name of the element related to source data/model implementation results		Обозначение Designation	Единица измерения Measure unit	Значение для слоя с индексом <i>s</i> Value for the layer with index <i>s</i>				
					1	2	3	4	5
1	Наименование материала слоя Name of layer material		—	—	Гипсовая штукатурка Gypsum plaster	Железобетон Reinforced concrete	Минераловатные плиты под штукатурный фасад Mineral wool boards for plaster facade	Клеевой состав по армирующей сетке Adhesive composition for reinforcing mesh	Керамическая облицовочная плитка Ceramic facing tiles
2	Количество альтернативных (стандартных) значений толщины материала, используемого в качестве слоя Number of alternative (standard) values of the thickness for the material used as layer		z_s	ед. unit	5	10	8	4	4
3	Коэффициент теплопроводности материала, используемого в качестве слоя Thermal conductivity coefficient of the material used as layer		λ_s	Вт/(м·°C) W/(m·°C)	0,3	2,04	0,039	0,8	1,05
4	Альтернативное (стандартное) значение толщины материала слоя, соответствующее индексу <i>k</i> Layer material thickness's alternative (standard) value corresponding to index <i>k</i>	1	$\delta_{sk=1}$	м m	0,01	0,15	0,05	0,005	0,006
5		2	$\delta_{sk=2}$	м m	0,015	0,2	0,08	0,006	0,008
6		3	$\delta_{sk=3}$	м m	0,02	0,25	0,1	0,008	0,01
7		4	$\delta_{sk=4}$	м m	0,025	0,3	0,15	0,012	0,012
8		5	$\delta_{sk=5}$	м m	0,03	0,35	0,2	—	—
9		6	$\delta_{sk=6}$	м m	—	0,4	0,3	—	—
10		7	$\delta_{sk=7}$	м m	—	0,45	0,4	—	—
11		8	$\delta_{sk=8}$	м m	—	0,5	0,5	—	—
12		9	$\delta_{sk=9}$	м m	—	0,55	—	—	—
13		10	$\delta_{sk=10}$	м m	—	0,6	—	—	—
14	Оптимальное значение толщины материала слоя Optimal value of layer material's thickness	не отвечающее требованиям дискретности/ бинарности not meeting discreteness/ binarity requirements	δ_s^{opt}	м m	0,01	0,599	0,096	0,005	0,006
15		отвечающее требованиям дискретности/ бинарности meeting discreteness/ binarity requirements	δ_s^{opt}	м m	0,01	0,5	0,1	0,005	0,006

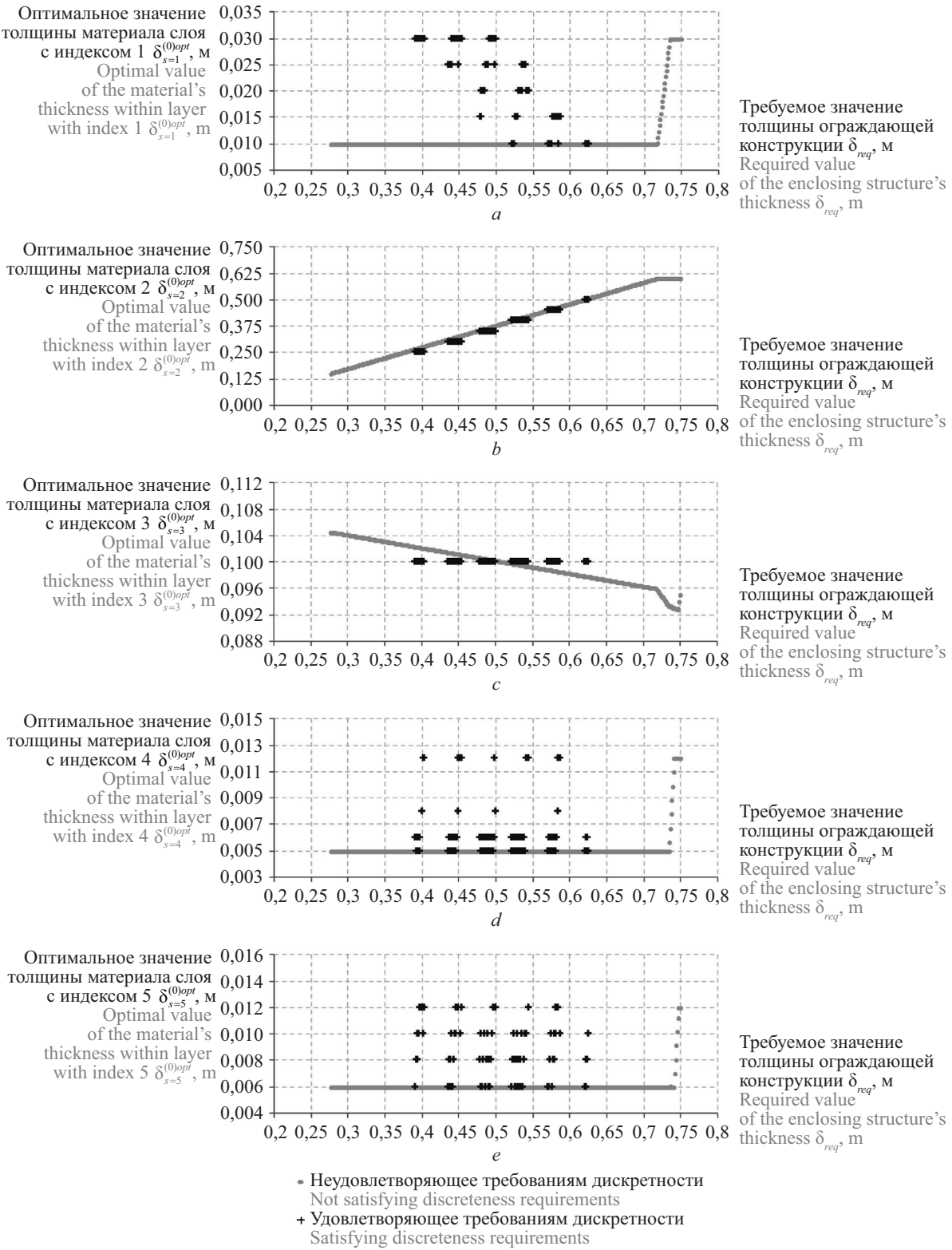


Рис. 3. Графики зависимостей оптимальных значений толщины материала слоя с индексом 1 (a); 2 (b); 3 (c); 4 (d) и 5 (e) от требуемого значения толщины конструкции

Fig. 3. Plots for dependences of the optimal values of the thickness of the layer material with index 1 (a); 2 (b); 3 (c); 4 (d) and 5 (e) on the required value of the structure's thickness

нимальных стандартных толщин слоев) до 1,154 м (сумма максимальных стандартных толщин слоев) с шагом 0,001 м (минимальная разница между по-
следовательными стандартными толщинами слоя в упорядоченном ряду) при фиксированных значениях остальных исходных данных, представленных

в табл. 4 и п. 1–13 табл. 5. Каждый вычислительный эксперимент соответствовал определенному значению требуемой толщины конструкции.

Из проведенных 934 экспериментов для каждой математической модели в 474 экспериментах удалось найти оптимальное решение без учета дискретности или бинарности (решение для корневой модели), причем из них 92 эксперимента привели к оптимальному решению с учетом требований дискретности или бинарности.

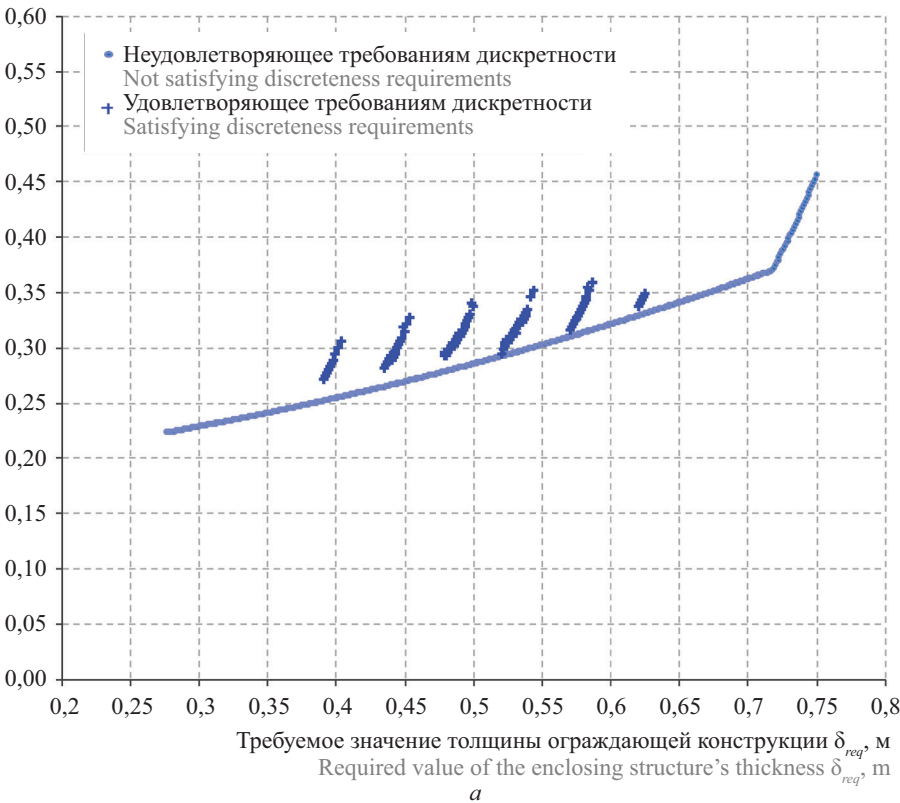
Результаты, полученные для модели с дискретными переменными (выражения (5)–(8)), совпали с аналогичными результатами для модели с бинарными переменными (выражения (14)–(18)): абсолютные разницы значений переменных в оптимальных решениях этих моделей оказались незначительными, варьируясь (по экспериментам) от $1,39 \cdot 10^{-16}$ м до $2,26 \cdot 10^{-4}$ м и составляя в среднем $4,12 \cdot 10^{-7}$ м. При этом длительность каждого отдельного эксперимента, выполненного в отношении модели с дискретными неизвестными переменными, оказалась в среднем на 30,816 % меньше аналогичной длительности для модели с бинарными неизвестными переменными. Данное обстоятельство, обусловленное, в первую очередь, существенно большим (в сравнении с моделью, определяемой выражениями (5)–(8)) количеством неизвестных переменных в составе модели, определяемой выражениями (14)–(18), позволило сделать

вывод об относительно высокой эффективности процесса реализации (с использованием предложенного вычислительного алгоритма) модели с дискретными неизвестными переменными относительно процесса реализации модели с бинарными переменными (с использованием предложенного алгоритма или существующих стандартных алгоритмов, характеризующихся схожими показателями трудоемкости).

На основе этих вычислительных экспериментов, в которых были найдены оптимальные решения с учетом и/или без учета требований дискретности (бинарности), были сформированы следующие зависимости:

- зависимость оптимального значения толщины материала каждого отдельного слоя стенового ограждения (пп. 2.1.1, 2.2.1 табл. 1) для решения, удовлетворяющего или неудовлетворяющего требованиям дискретности (бинарности) от требуемого значения ее толщины;
- зависимость значения интегрального показателя сопротивления теплопередаче стенового ограждения (п. 2.7 табл. 2) в оптимальном решении, удовлетворяющем или неудовлетворяющем требованиям дискретности (бинарности), от требуемого значения ее толщины;
- зависимость значения средневзвешенной (по толщине слоев) температуры стенового ограждения (п. 2.8 табл. 2) в оптимальном решении, удовлетворяющем

Интегральный показатель термического сопротивления ограждающей конструкции для оптимального решения $\Theta^{(0)opt}$, $\text{м}^3 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$
Integral indicator of the enclosing structure's thermal resistance for the optimal solution $\Theta^{(0)opt}$, $\text{m}^3 \cdot \text{°C}/\text{W}$



Средневзвешенная (по толщине слоев) температура ограждающей конструкции для оптимального решения $\bar{t}^{(0)opt}, ^\circ\text{C}$
Enclosing structure's weighted average (by the thickness of layers) temperature for the optimal solution $\bar{t}^{(0)opt}, ^\circ\text{C}$

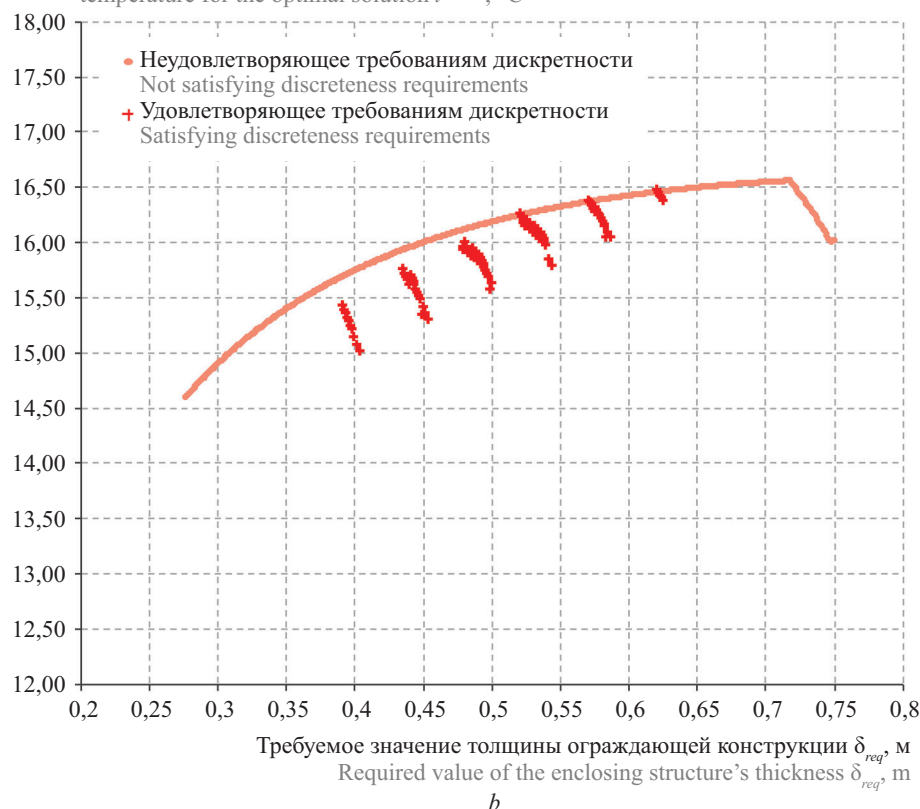


Рис. 4. Графики зависимостей значений интегрального показателя сопротивления теплопередаче (а) и средневзвешенной (по толщине слоев) температуры конструкции (b), соответствующих оптимальному решению, от требуемого значения ее толщины

Fig. 4. Plots for dependences of the enclosing structure's integral indicator of thermal resistance (a) and weighted average (by the thickness of layers) temperature (b) for the optimal solution on the required value of the structure's thickness

или неудовлетворяющем требованиям дискретности (бинарности), от требуемого значения ее толщины.

Графическое описание вышеперечисленных зависимостей, соответствующих результатам реализации модели с дискретными неизвестными переменными, представлено на рис. 3, 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе результатов выполнения вычислительных экспериментов, определяемых в том числе содержанием рис. 3, 4, были сделаны следующие выводы:

1. Оптимальные значения толщин материалов отдельных слоев в составе стенового ограждения, а также соответствующие им значения теплотехнических показателей определены для требуемых значений толщины конструкции:

- в диапазоне от 0,276 до 0,749 м — для оптимального решения, полученного без учета требований дискретности (бинарности);
- в диапазоне от 0,392 до 0,625 м — для оптимального решения, полученного с учетом требований дискретности (бинарности).

2. Зависимости полученных без учета требований дискретности (бинарности) оптимальных значений толщин материалов отдельных слоев в составе стенового ограждения от требуемого значения ее толщины являются кусочно-линейными; характер изменения вышеупомянутых оптимальных значений толщин слоев позволяет выделить интервалы изменения требуемого значения толщины конструкции, в рамках каждого из которых происходит изменение оптимальных толщин не более чем у двух отдельных слоев конструкции (при этом оптимальные значения толщин остальных слоев не претерпевают изменений):

- интервал от 0,276 до 0,716 м — линейное увеличение оптимальной толщины несущего слоя (с индексом 2) от значения 0,151 м до максимально допустимого значения при одновременном линейном уменьшении оптимальной толщины теплоизоляционного слоя (с индексом 3) от значения 0,1045 м до значения 0,096 м;
- интервал от 0,717 до 0,734 м — линейное увеличение оптимальной толщины внутреннего слоя (с индексом 1) от минимально допустимого значения до максимального допустимого значения при даль-

нейшем линейном уменьшении оптимальной толщины теплоизоляционного слоя (с индексом 3) от значения 0,096 до значения 0,0934 м;

- интервал от 0,735 до 0,741 м — линейное увеличение оптимальной толщины клеевого слоя (с индексом 4) от минимально допустимого значения до максимального допустимого значения при дальнейшем линейном уменьшении оптимальной толщины теплоизоляционного слоя (с индексом 3) от значения 0,0934 до значения 0,0931 м;

- интервал от 0,742 до 0,746 м — линейное увеличение оптимальной толщины наружного слоя (с индексом 5) от минимально допустимого значения до максимального допустимого значения при дальнейшем (достаточно малом) линейном уменьшении оптимальной толщины теплоизоляционного слоя (с индексом 3) от значения 0,0931 до значения 0,093 м;

- интервал от 0,746 до 0,749 м — линейное увеличение оптимальной толщины теплоизоляционного слоя (с индексом 3) от 0,093 до 0,095 м.

3. Зависимости значений теплотехнических показателей — интегрального показателя сопротивления теплопередаче, средневзвешенной (по толщине слоев) температуры — конструкции, соответствующих оптимальным значениям толщин материалов слоев, указанным в п. 2 выводов, являются кусочно-нелинейными; характер изменения вышеупомянутых значений теплотехнических показателей позволяет выделить следующие интервалы изменения требуемого значения толщины конструкции:

- интервал от 0,276 до 0,716 м — нелинейный ускоряющийся рост интегрального показателя сопротивления теплопередаче от значения 0,224 до значения 0,371 м³·°C/Вт, нелинейный тормозящийся рост средневзвешенной (по толщине слоев) температуры конструкции от значения 14,611 до значения 16,571 °C;

- интервал от 0,717 до 0,749 м — нелинейный ускоряющийся рост интегрального показателя сопротивления теплопередаче от значения 0,371 до значения 0,457 м³·°C/Вт, нелинейный ускоряющийся спад средневзвешенной (по толщине слоев) температуры конструкции от значения 16,571 до значения 16,032 °C.

4. Зависимости полученных с учетом требований дискретности (бинарности) оптимальных значений толщин материалов отдельных слоев стенового ограждения, а также соответствующих значений теплотехнических показателей конструкции от требуемого значения ее толщины характеризуются относительно малым количеством точек, являются фрагментарными и не имеют явно выраженной тенденции, что обусловлено особенностями формирования оптимального решения для математических моделей, базирующихся на дискретных или бинарных переменных.

5. Наиболее предпочтительная комбинация стандартных, полученных без учета требований дискретности (бинарности) толщин слоев, толщин ма-

териалов слоев соответствует наибольшему расчетному значению средневзвешенной (по толщине слоев) температуры конструкции, составляющему 16,571 °C, при требуемом значении толщины конструкции, соответствующем 0,716 м (упомянутые значения толщин материалов слоев указаны в строке 14 табл. 5).

6. Наиболее предпочтительная комбинация стандартных, полученных с учетом требований дискретности (бинарности) толщин слоев, толщин материалов слоев соответствует наибольшему расчетному значению средневзвешенной (по толщине слоев) температуры конструкции, составляющему 16,472 °C, при требуемом значении толщины конструкции, соответствующем 0,621 м (упомянутые значения толщин материалов слоев указаны в строке 15 табл. 5).

Таким образом, результаты проведенных вычислительных экспериментов образуют основу для формирования конструктивных решений по отношению к стеновым ограждениям в составе жилых зданий с учетом ограниченного количества вариантов (моделей) строительных материалов, что подтверждает практическую ценность разработанных математических моделей.

В процессе выполнения исследования получены следующие результаты:

1. Проведен обзор и сравнительный анализ научных работ по обоснованию характеристик конструктивных решений, применяемых к ограждающим конструкциям в жилищном строительстве. Анализ показал недостаточную проработку вопросов учета требований дискретности при решении задач обоснования характеристик таких конструкций.

2. Разработаны математические модели для обоснования стандартных значений характеристик материалов, применяемых в слоях ограждающей конструкции, с учетом показателей средневзвешенной температуры, общей толщины и термического сопротивления. Эти модели включают квадратичную целевую функцию и линейные непрямые ограничения.

3. Создан алгоритм для реализации этих математических моделей, основанный на сочетании метода ветвей и границ и метода внутренней точки для поиска оптимальных значений переменных, ограниченных по дискретности или бинарности.

4. Произведена практическая реализация разработанных моделей, что позволило подтвердить их высокую практическую значимость на основе полученных данных.

На основе результатов, полученных в рамках исследования, были сделаны следующие выводы:

- задача определения комбинации стандартных значений толщин материалов, используемых в качестве слоев стенового ограждения, может быть эффективно решена с использованием средств квадратичной оптимизации;

- для учета ограничений дискретности или бинарности неизвестных переменных в составе ма-

тематических моделей квадратичной оптимизации целесообразно использовать метод ветвей и границ со специфическими правилами реализации процедур ветвления.

На дальнейших этапах исследования планируется реализация разработанных математических моде-

лей (с использованием созданного алгоритма) по отношению к альтернативным вариантам стенового ограждения — вентилируемый фасад по железобетонному или кирпичному основанию, штукатурный фасад по железобетонному или кирпичному основанию и т.д.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yu W., Li B., Jia H., Zhang M., Wang D. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 135–143. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.063
2. Benaddi F.Z., Boukhattem P., Tabares-Velasco P.C. Multi-objective optimization of building envelope components based on economic, environmental, and thermal comfort criteria // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 305. P. 113909. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.113909
3. Liu Y., Li T., Xu W., Wang Q., Huang H., He B.J. Building information modelling-enabled multi-objective optimization for energy consumption parametric analysis in green buildings design using hybrid machine learning algorithms // *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 300. P. 113665. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113665
4. Delgarm N., Sajadi B., Delgarm S. Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC) // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 131. Pp. 42–53. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.09.003
5. He L., Zhang L. A bi-objective optimization of energy consumption and investment cost for public building envelope design based on the ϵ -constraint method // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 266. P. 112133. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112133
6. Karmellos M., Kiprakis A., Mavrotas G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies // *Applied Energy*. 2015. Vol. 139. Pp. 131–150. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.11.023
7. Yang H., Xu Z., Shi Y., Tang W., Liu Ch., Yunusa-Kaltungo A. et al. Multi-objective optimization designs of phase change material-enhanced building using the integration of the Stacking model and NSGA-III algorithm // *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 68. P. 107807. DOI: 10.1016/j.est.2023.107807
8. Asadi E., Gameiro da Silva M., Antunes C.H., Dias L., Glucksman L. Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 81. Pp. 444–456. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.009
9. Hosamo H.H., Tingstveit M.S., Nielsen H.K., Svennevig P.R., Svidt K. Multiobjective optimization of building energy consumption and thermal comfort based on integrated BIM framework with machine learning-NSGA II // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 277. P. 112479. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112479
10. Rosso F., Ciancio V., Dell’Olmo J., Salata F. Multi-objective optimization of building retrofit in the Mediterranean climate by means of genetic algorithm application // *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 216. P. 109945. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109945
11. Wu C., Pan H., Luo Zh., Liu Ch., Huang H. Multi-objective optimization of residential building energy consumption, daylighting, and thermal comfort based on BO-XGBoost-NSGA-II // *Building and Environment*. 2024. Vol. 254. P. 111386. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111386
12. Ouanes S., Sriti L. Regression-based sensitivity analysis and multi-objective optimisation of energy performance and thermal comfort: Building envelope design in hot arid urban context // *Building and Environment*. 2023. Vol. 248. P. 111099. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.111099
13. Wong B., Wu Zh., Gan V., Chan C., Cheng J. Parametric building information modelling and optimality criteria methods for automated multi-objective optimisation of structural and energy efficiency // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 75. P. 107068. DOI: 10.1016/j.job.2023.107068
14. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects // *AlfaBuild*. 2021. No. 5 (20). P. 2003. DOI: 10.57728/ALF.20.3. EDN RZOJPY.
15. Yang J., Wu H., Xu X., Huang G., Cen J., Liang Y. Regional climate effects on the optimal thermal resistance and capacitance of residential building walls // *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 244. P. 111030. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111030
16. Sánchez-Zabala V.F., Gomez-Acebo T. Building energy performance metamodells for district energy management optimisation platforms // *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 21. P. 100512. DOI: 10.1016/j.ecmx.2023.100512
17. Shi Y., Chen P. Energy retrofitting of hospital buildings considering climate change: An approach integrating automated machine learning with NSGA-III for multi-objective optimization // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 319. P. 114571. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114571
18. Huang J., Lv H., Gao T., Feng W., Chen Y., Zhou T. Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 75. Pp. 504–510. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.02.040

19. Гамаюнова О.С. Методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 166 с. EDN CJHWXK.

20. Иванова В.Р., Жидко Е.А. Сравнение вариантов утеплителя для реконструкции жилого дома методом анализа иерархий // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2019. № 3–4 (17–18). С. 183–188. EDN THYVAJ.

21. Иванова И.Б., Романов М.А. Выбор проектного решения на основе системы показателей с использованием метода парных сравнений // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2019. № 1 (36). С. 80–82. EDN UQDZZK.

22. Радаев А.Е., Гамаюнова О.С., Бардина Г.А. Использование средств оптимизационного моделирования для обоснования характеристик энергоэффективного конструктивного решения // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 27 (79). С. 5–25. EDN EXVSFS.

23. Радаев А.Е., Гамаюнова О.С. Обоснование характеристик многослойной стеновой конструкции с использованием средств квадратичного программирования // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 111–127. DOI: 10.37279/2413-1873-2021-22-111-127. EDN ORVFEG.

24. Резанов Е.М., Петров П.В. Повышение эффективности утепления стен зданий с учетом регулирования отпускаемой тепловой энергии // Известия Транссиба. 2019. № 4 (40). С. 77–86. EDN DWXNDX.

25. Петров П.В., Кулагин В.А., Резанов Е.М., Стариков А.П. Совершенствование технологии теплоизоляции зданий // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 16. № 2. С. 187–197. EDN IXBHRM.

26. Deep K., Singh K.P., Kansal M.L., Mohan C. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems // Applied Mathematics and Computation. 2009. Vol. 212. Issue 2. Pp. 505–518. DOI: 10.1016/j.amc.2009.02.044

Поступила в редакцию 14 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 24 декабря 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Янис Айгарсович Олехнович** — старший преподаватель, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 820961, Scopus: 57212393243, ResearcherID: AAE-4749-2020, ORCID: 0000-0001-9578-7245; olehnovich_yaa@spbstu.ru;

Антон Евгеньевич Радаев — кандидат технических наук, кандидат экономических наук, доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 650856, Scopus: 57196054199, ResearcherID: R-6085-2016, ORCID: 0000-0002-0840-6828; radaev_ae@spbstu.ru.

Вклад авторов:

Олехнович Я.А. — формулирование целей и задач исследования, обзор литературы, участие в разработке математических моделей и алгоритма, подготовка данных для вычислительных экспериментов.

Радаев А.Е. — участие в разработке математических моделей и алгоритма, анализ результатов вычислительных экспериментов, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Yu W., Li B., Jia H., Zhang M., Wang D. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings*. 2015; 88:135-143. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.063

2. Benaddi F.Z., Boukhattem P., Tabares-Velasco P.C. Multi-objective optimization of building envelope components based on economic, environmental, and thermal comfort criteria. *Energy and Buildings*. 2024; 305:113909. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.113909

3. Liu Y., Li T., Xu W., Wang Q., Huang H., He B.J. Building information modelling-enabled multi-objective optimization for energy consumption parametric analysis

in green buildings design using hybrid machine learning algorithms. *Energy and Buildings*. 2023; 300:113665. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113665

4. Delgarm N., Sajadi B., Delgarm S. Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). *Energy and Buildings*. 2016; 131:42-53. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.09.003

5. He L., Zhang L. A bi-objective optimization of energy consumption and investment cost for public building envelope design based on the ϵ -constraint method. *Energy and Buildings*. 2022; 266:112133. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112133

6. Karmellos M., Kiprakis A., Mavrotas G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. *Applied Energy*. 2015; 139:131-150. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.11.023
7. Yang H., Xu Z., Shi Y., Tang W., Liu Ch., Yunusa-Kaltungo A. et al. Multi-objective optimization designs of phase change material-enhanced building using the integration of the Stacking model and NSGA-III algorithm. *Journal of Energy Storage*. 2023; 68:107807. DOI: 10.1016/j.est.2023.107807
8. Asadi E., Gameiro da Silva M., Antunes C.H., Dias L., Glicksman L. Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy and Buildings*. 2014; 81:444-456. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.009
9. Hosamo H.H., Tingstveit M.S., Nielsen H.K., Svennevig P.R., Svidt K. Multiobjective optimization of building energy consumption and thermal comfort based on integrated BIM framework with machine learning-NSGA II. *Energy and Buildings*. 2022; 277:112479. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112479
10. Rosso F., Ciancio V., Dell'Olmo J., Salata F. Multi-objective optimization of building retrofit in the Mediterranean climate by means of genetic algorithm application. *Energy and Buildings*. 2020; 216:109945. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109945
11. Wu C., Pan H., Luo Zh., Liu Ch., Huang H. Multi-objective optimization of residential building energy consumption, daylighting, and thermal comfort based on BO-XGBoost-NSGA-II. *Building and Environment*. 2024; 254:111386. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111386
12. Ouane S., Sriti L. Regression-based sensitivity analysis and multi-objective optimisation of energy performance and thermal comfort: Building envelope design in hot arid urban context. *Building and Environment*. 2023; 248:111099. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.111099
13. Wong B., Wu Zh., Gan V., Chan C., Cheng J. Parametric building information modelling and optimality criteria methods for automated multi-objective optimisation of structural and energy efficiency. *Journal of Building Engineering*. 2023; 75:107068. DOI: 10.1016/j.job.2023.107068
14. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects. *AlfaBuild*. 2021; 5(20):2003. DOI: 10.57728/ALF.20.3. EDN RZOJPY.
15. Yang J., Wu H., Xu X., Huang G., Cen J., Liang Y. Regional climate effects on the optimal thermal resistance and capacitance of residential building walls. *Energy and Buildings*. 2021; 244:111030. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111030
16. Sánchez-Zabala V.F., Gomez-Acebo T. Building energy performance metamodells for district energy management optimisation platforms. *Energy Conversion and Management: X*. 2024; 21:100512. DOI: 10.1016/j.ecmx.2023.100512
17. Shi Y., Chen P. Energy retrofitting of hospital buildings considering climate change: An approach integrating automated machine learning with NSGA-III for multi-objective optimization. *Energy and Buildings*. 2024; 319:114571. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114571
18. Huang J., Lv H., Gao T., Feng W., Chen Y., Zhou T. Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings. *Energy and Buildings*. 2014; 75:504-510. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.02.040
19. Gamayunova O.S. *Procedure for determination of the thermal characteristics for wall structures of residential buildings : dis. ... cand. tech. sciences*. St. Petersburg, 2021; 166. EDN CJHWXK. (rus.).
20. Ivanova V.R., Zhidko E.A. A comparison of insulation options for reconstruction of residential house method of analysis of hierarchies. *Information Technologies in Construction, Social and Economic Systems*. 2019; (3-4):(17-18):183-188. EDN THYVAJ. (rus.).
21. Ivanova I.B., Romanov M.A. Selection of the design solution based on the system of indicators using the method of pair comparisons. *Social and Economic Management: Theory and Practice*. 2019; 1(36):80-82. EDN UQDZZK. (rus.).
22. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Use of optimization modeling tools to justify the characteristics of energy efficient structural solution. *Construction and Industrial Safety*. 2022; 27(79):5-25. EDN EXVSFS. (rus.).
23. Radaev A.E., Gamayunova O.S. Determination of the characteristics for a multilayer wall's structure with application of quadratic programming tools. *Construction and Industrial Safety*. 2021; 22(74):111-127. DOI: 10.37279/2413-1873-2021-22-111-127. EDN ORVFEG. (rus.).
24. Rezanov E.M., Petrov P.V. Increasing the efficiency of warming of building walls taking into account the regulation of the released heat energy. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019; 4(40):77-86. EDN DWXNDX. (rus.).
25. Petrov P.V., Kulagin V.A., Rezanov E.M., Starikov A.P. Improvement of technology of thermal insulation of buildings. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2023; 16(2):187-197. EDN IXBHRM. (rus.).
26. Deep K., Singh K.P., Kansal M.L., Mohan C. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*. 2009; 212(2):505-518. DOI: 10.1016/j.amc.2009.02.044

Received August 14, 2024.

Adopted in revised form on December 14, 2024.

Approved for publication on December 24, 2024.

B I O N O T E S : **Yanis A. Olekhnovich** — senior lecturer, Graduate School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering; **Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 194356, Russian Federation; ID RSCI: 820961, Scopus: 57212393243, ResearcherID: AAE-4749-2020, ORCID: 0000-0001-9578-7245; olekhnovich_yaa@spbstu.ru;

Anton E. Radaev — Candidate of Technical Sciences, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Graduate School of Industrial of Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering; **Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 194356, Russian Federation; ID RSCI: 650856, Scopus: 57196054199, ResearcherID: R-6085-2016, ORCID: 0000-0002-0840-6828; radaev_ac@spbstu.ru.

Contribution of the authors:

Yanis A. Olekhnovich — formulation of the aim and tasks of the research, literature review, participation in the development of mathematical models and algorithm, preparation of data for computational experiments.

Anton E. Radaev — participation in the development of mathematical models and algorithm, analysis of the results of computational experiments, scientific text editing.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.421

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.215-230

Прочность и деформативность складчатых элементов из текстильно-армированного бетона

Анна Евгеньевна Донцова, Олег Николаевич Столяров*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследуется поведение складчатых элементов из текстильно-армированного бетона при нагружении. Текстильно-армированный бетон — относительно новый строительный материал, привлекающий все больший интерес исследователей. Поскольку плоские конструкции из текстильно-армированного бетона являются тонкими в сечении, они не подходят для покрытия пролетных зданий и сооружений. Однако при этом текстильно-армированный бетон хорошо подходит для изготовления складчатых покрытий, аналогичных покрытиям из армоцемента. Цель исследования — изучение прочностных свойств поперечных сечений складок из текстильно-армированного бетона под нагрузкой.

Материалы и методы. В рамках работы запроектированы, изготовлены и испытаны опытные образцы складок из текстильно-армированного бетона с армированием основовязаными сетками из щелочестойких стеклянных волокон (AR) и углеродных волокон (C). По результатам испытаний проведено сравнение свойств складок в зависимости от их формы (треугольная или трапецеидальная) и типа армирования.

Результаты. Средняя разрушающая нагрузка для треугольных складок составила 5,9 кН для неармированных образцов, 4,8 кН для образцов, армированных AR-ровингами, и 3,6 кН для образцов, армированных C-ровингами. Для трапецеидальных складок средняя разрушающая нагрузка — 8,0 кН для неармированных образцов, 8,7 кН для AR-армирования и 10,7 кН для C-армирования. Средняя прочность мелкозернистого бетона на сжатие — 25,08 МПа. Прочность элементов складок на изгиб — 7,29 МПа для неармированных образцов, 9,33 МПа для AR-армированных образцов и 15,4 МПа для C-армированных образцов.

Выводы. Существующей в настоящее время нормативной базы недостаточно для широкого применения изделий из текстильно-армированного бетона в строительстве. На сегодняшний день имеются разрозненные экспериментальные и теоретические наработки по механическим свойствам материала и поведению конструкций из текстильно-армированного бетона под нагрузкой. Приведены экспериментальные сведения о поведении складчатых элементов из текстильно-армированного бетона под нагружением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: текстильно-армированный бетон, композитная арматура, покрытия, складки, оболочки, тонкостенные конструкции, облегченные бетонные конструкции, эксперимент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Донцова А.Е., Столяров О.Н. Прочность и деформативность складчатых элементов из текстильно-армированного бетона // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 215–230. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.215-230

Автор, ответственный за переписку: Анна Евгеньевна Донцова, anne.dontsoova@ya.ru.

Strength and deformability of folded elements made of textile-reinforced concrete

Anna E. Dontsova, Oleg N. Stolyarov*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint-Petersburg, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The behaviour of folded elements made of textile-reinforced concrete under loading is investigated. Textile-reinforced concrete is a relatively new building material that is attracting increasing interest from researchers. Because the elements of textile-reinforced concrete are thin in cross section, they cannot cover large-span buildings. However, textile-reinforced concrete is well suited for the production of folded shells, as in the case of ferrocement. The aim of this study is to investigate the strength of textile-reinforced concrete folds under loading.

Materials and methods. Textile-reinforced concrete folded specimens were manufactured. Warp-knitted meshes made of alkali-resistant glass fibres (AR) and carbon fibres (C) were used to reinforce the elements. The specimens were tested. Based on the test results, a comparison of the fold properties was performed depending on their shape (triangular or trapezoidal) and type of reinforcement.

Results. The average failure load for the triangular folds was 5.9 kN for nonreinforced specimens, 4.8 kN for specimens reinforced with AR rovings, and 3.6 kN for specimens reinforced with C rovings. For the trapezoidal folds, the average failure load was 8.0 kN for nonreinforced specimens, 8.7 kN for AR reinforcement, and 10.7 kN for C reinforcement. The average compressive strength of fine-grain concrete was 25.08 MPa. The flexural strength of the fold elements was 7.29 MPa for nonreinforced specimens, 9.33 MPa for AR-reinforced specimens, and 15.4 MPa for C-reinforced specimens.

Conclusions. The currently existing regulatory framework is insufficient for wide application of textile-reinforced concrete products in construction. To date, there are scattered experimental and theoretical studies on the mechanical properties of the material and the behaviour of structures made of textile-reinforced concrete under loading. Experimental data on the behaviour of folded elements made of textile-reinforced concrete under loading are presented.

KEYWORDS: textile-reinforced concrete, composite reinforcement, roofing, folds, folded elements, shell structures, thin-walled structures, lightweight concrete elements, experiment

FOR CITATION: Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Strength and deformability of folded elements made of textile-reinforced concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):215-230. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.215-230 (rus.).

Corresponding author: Anna E. Dontsova, anne.dontsoova@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Текстильно-армированный бетон представляет собой композит из мелкозернистого бетона и неметаллической армирующей сетки. Он является относительно новым материалом в строительстве. Считается, что текстильно-армированный бетон — это пересмотр армоцемента, широко используемого для конструирования пространственных покрытий зданий и сооружений в середине XX в. Возведение легких тонкостенных пространственных конструкций позволяло снизить перерасход бетона и собственный вес покрытий. В Ленинграде было возведено множество объектов с применением армоцементных элементов — арок, складов и панелей. В основном конструировались покрытия рынков, складов, трамвайных парков^{1, 2, 3}. Яркий объект, сохранившийся до сих пор, покрытый армоцементными арками — здание Московского рынка (ул. Решетникова, 12). Складчатые конструкции можно найти на примере наземного павильона станции метро «Пионерская» и здания завода минеральных вод «Полострово».

Снижение популярности армоцемента обусловлено весомыми недостатками, выявленными в ходе эксплуатации конструкций с его применением. Низкая толщина элементов, выгодная с экономической и конструктивной точек зрения, оказалась недостаточной для защиты армирующих стержней от коррозии. В результате в течение относительно короткого времени эксплуатации армирующие стержни и сетки оголялись, бетонная матрица отслаивалась от армирующей основы, и стальные элементы подвергались коррозии под воздействием атмосферных факторов.

В изготовлении текстильно-армированного бетона используют полотна и сетки из высокопрочных нитей. Как правило, они состоят из щелочестойких

стеклянных, углеродных или базальтовых волокон. Перечисленные материалы не подвержены коррозии, и зачастую химически и электрически нейтральны. Замена армоцементных конструкций с металлическим армированием на конструкции из текстильно-армированного бетона дает развитие теории и методикам расчета пространственных покрытий зданий и сооружений.

Отсутствие коррозии арматуры у строительных конструкций из текстильно-армированного бетона является важным достоинством для применения таких конструкций в покрытиях зданий в России. Климатические особенности многих регионов страны, такие как высокая влажность воздуха, частые переходы температуры воздуха через 0 °С, и наличие в воздухе солей ввиду близости морского побережья провоцируют ускоренное оголение и коррозию стальной арматуры. Использование химически нейтральных волокон позволяет создавать более долговечные конструкции.

Отсутствие стального армирования в конструкциях также делает их более проницаемыми для радиосигналов, что особенно актуально в эпоху развития информационных технологий и беспроводной связи.

Пространственные покрытия по форме можно разделить на четыре большие группы: арочные, складчатые, оболочки ненулевой гауссовой кривизны и нерегулярные структуры. Складчатые конструкции получили развитие вместе с распространением железобетона. Основы расчета складчатых конструкций были введены Г. Элерсом, Г. Кремером, И. Гольденблатом, Э. Ратцем, П.А. Школьным в 1930–40 годы^{3, 4}. «Безмоментные» теории расчета и теории расчета по методу сил были далее развиты и изложены в 1960 гг. Г.К. Хайдуковым^{5, 6}. Инженеры нередко использова-

¹ Лысенко Е.Ф. Армоцементные конструкции / под ред. В.В. Гаркуша. Киев : Издательское объединение «Вища школа», 1974. 208 с.

² Соколов Б.С. и др. Пособие по проектированию армоцементных конструкций. М. : Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве, 2020. 103 с.

³ Элерс Г. и др. Складчатые железобетонные конструкции / под общ. ред. проф. Я.В. Столярова. Харьков; Киев : Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1934. 136 с.

⁴ Школьный П.А. Безмоментная теория расчета складчатых конструкций с несимметричным опиранием граней / под ред. Я.В. Столярова. Харьков : Государственное научно-техническое издательство Украины, 1937. 122 с.

⁵ Армоцементные конструкции в жилищном, промышленном и сельскохозяйственном строительстве / под ред. Г.К. Хайдукова. М. : Госстройиздат, 1963. 246 с.

⁶ Тонкостенные железобетонные пространственные конструкции / под ред. Г.К. Хайдукова. М. : Госстрой СССР, Научно-исследовательский институт бетона и железобетона, 1970. 231 с.

ли складчатые формы при проектировании покрытий павильонов станций Ленинградского метрополитена. Наиболее примечательна кровля павильона станции метро «Пионерская». В 20-х годах XXI в. присутствует тенденция повторного повышения интереса к использованию складчатых форм в архитектуре, о чем можно судить по возрастающему числу научных публикаций по данной тематике [1–6].

За последние годы наблюдается возрастающее число публикаций, исследующих текстильно-армированный бетон. Ведется всестороннее изучение свойств материала и поиск ниш, наиболее подходящих для его применения.

Все больше появляется исследований, посвященных сравнению различных типов армирования для выявления наилучшей комбинации армирующей сетки и бетонной матрицы [7–14]. В работе [8] изучается изменение прочностных свойств и схем разрушения текстильно-армированного бетона, армированного сеткой из щелочестойкого стекловолокна, в зависимости от конфигурации сеток и наличия эпоксидного покрытия ровингов. Ведется также подбор составов бетонных смесей, подходящих для изготовления изделий из текстильно-армированного бетона. Экспериментально исследованы возможности введения в бетонную смесь различных добавок, а также полимерной фибры для улучшения механических свойств готового композита [10]. Поскольку текстильно-армированный бетон может быть армирован углеродными волокнами, перспективным свойством такого композита является возможность осуществления мониторинга технического состояния конструкций: регистрирование трещин, отслеживание напряженно-деформированного состояния конструкции и фиксирование утечек в бетонных трубах и лотках [15, 16]. Рассматриваются не только возможности применения текстильно-армированного бетона как автономного строительного материала, но и возможности использования его в реставрации и укреплении уже имеющихся конструкций [17].

Одним из широко обсуждаемых недостатков текстильно-армированного бетона служит его слабая огнестойкость при армировании композита стеклянными сетками. Армирование углеродными ровингами, хоть и является более дорогостоящей альтернативой, считается более надежным в вопросах пожаробезопасности [9]. Еще один важный вопрос, требующий детального рассмотрения и экспериментального подтверждения, — долговечность текстильно-армированного бетона и предсказуемость его поведения под нагрузкой на всем сроке эксплуатации [18–20].

Малая толщина полотна из текстильно-армированного бетона делает его подходящим материалом для изготовления тонкостенных конструкций. Экспериментально изготовлен двутавр из текстильно-армированного бетона и испытан как однопролетная балка на четырехточечный изгиб [21]. В целом изготовление пространственных конструкций из тек-

стильно-армированного бетона — перспективное направление его применения [22–24]. Выполнено цифровое моделирование складчатых покрытий различных конфигураций из текстильно-армированного бетона [25, 26].

Несмотря на возрастающий интерес исследователей к представленному материалу, большинство статей по данной тематике — обзорные или аналитические. Для практического применения текстильно-армированного бетона в строительстве необходимо создание нормативной документации по проектированию и расчету строительных конструкций на его основе, которая, в свою очередь, должна опираться на экспериментальную и теоретическую базу.

Проектирование новых облегченных складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона основывается на исследованиях, проведенных ранее, результаты которых опубликованы в трудах [27–31]. Обоснован выбор формы складчатых конструкций [28]. Показаны технологические особенности изготовления тонкостенных элементов из текстильно-армированного бетона [27]. Конструктивные свойства другой категории облегченных пространственных покрытий — арок — представлены в публикации [31].

В данной работе впервые исследовано поведение трапециoidalной и треугольной складок из текстильно-армированного бетона под нагрузкой. Проанализированы варианты армирования сетками из стеклянных и углеродных волокон. Обобщены сценарии разрушения складок и рассмотрено влияние закрепления складки на ее разрушение.

Цель исследования — изучение прочностных свойств поперечных сечений складок из текстильно-армированного бетона под нагрузкой. Для этого в работе поставлены следующие задачи:

1. Запроектировать складки, изготовить и провести испытания на их разрушение под нагрузкой на основании имеющихся знаний о складчатых бетонных конструкциях.
2. Сравнить свойства элементов конструкций из текстильно-армированного бетона, армированных различными высокомодульными волокнами, и неармированных элементов.
3. Экспериментально оценить свойства текстильно-армированного бетона для изготовления складок: прочность на сжатие, прочность на изгиб.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения испытаний прочностных свойств поперечных сечений складок из текстильно-армированного бетона были запроектированы образцы складчатых строительных конструкций шириной $b = 50$ мм, с толщиной сечения $t = 10$ мм, армированные одной сеткой из стеклянных или углеродных ровингов, располагающейся на центральной оси сечения. Основой для проектирования складчатых сечений стали указания действующих нормативных документов,

а именно СП 387.1325800.2018 «Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Правила проектирования» и СП 96.13330.2016 «Армоцементные конструкции». Запроектированные сечения изображены на рис. 1. Подробное обоснование выбора формы поперечных сечений складок приведено в труде [28].

Основные геометрические параметры запроектированных складок представлены на рис. 1 и сведены в табл. 1.

В промышленных условиях тонкостенные складки, как правило, изготавливают торкретированием. Однако в данной работе образцы складок были забетонированы при помощи виброформования. Для производства образцов одноразовые съемные опалубки из полилактида (PLA) напечатаны на 3D-принтере. В ходе предыдущих исследований выявлено, что такая оснастка является наименее ресурсозатратной в лабораторном исполнении для изготовления небольших образцов пространственных конструкций сложной формы. Опыт производства одноразовых и многоразовых опалубок из различных материалов для бетонирования складок изложен в работе [27].

Всего подготовлено 30 опалубочных формочек. Для каждой формы складки предназначалось по 15 опалубок, из которых 5 забетонировано без армиро-

вания, 5 — с армированием сеткой из стекловолокна, и 5 — с углеродным армированием. Опалубочные формы показаны на рис. 2.

Мелкозернистый бетон

Для изготовления текстильно-армированного бетона используется мелкозернистый бетон. Размеры заполнителя ограничены размерами ячеек армирующей сетки. С целью свободного проникновения бетонной смеси через ячейки сетки и достаточного сцепления бетонной смеси с армирующей сеткой максимальный размер заполнителя не должен превышать 1–2 мм.

В данном исследовании складки бетонировались мелкозернистым бетоном на строительном кварцевом песке мелкой фракции. Производителем песка (ООО «ТД “Ремикс”», г. Санкт-Петербург, Россия) заявлено соответствие ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и следующие свойства песка: размер частиц 0–0,63 мм; содержание глинистой составляющей менее 5 %; содержание кварца более 82 %; температура обработки песка 700 °С. В качестве вяжущего использован портландцемент марки М400 (ЦЕМ II А-Ш 32,5). Для повышения удобоукладываемости смеси в состав бетонной смеси добавлялась пластифицирующая и водоредуцирующая добавки (ООО «Зика»,

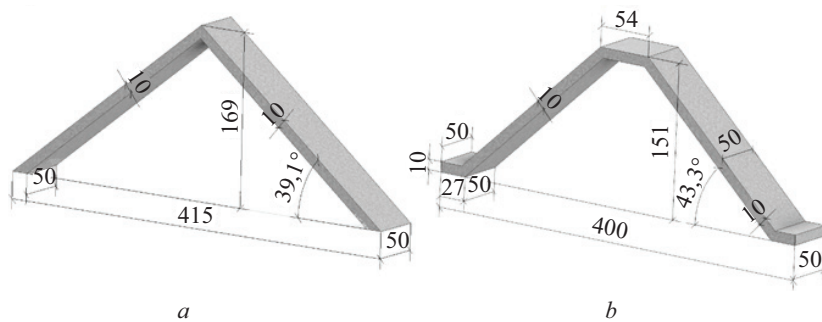


Рис. 1. Запроектированные складки: а — треугольная складка; б — трапецидальная складка

Fig. 1. Textile-reinforced concrete folded elements: a — triangle fold; b — trapezoidal fold

Табл. 1. Геометрические параметры складок

Table 1. Geometric parameters of the folded elements

Характеристика Property	Треугольная складка Triangle fold	Трапецидальная складка Trapezoidal fold
Ширина b , мм Width b , mm	50	50
Толщина сечения t , мм Cross-section thickness t , mm	10	10
Длина складки l , мм Fold's length l , mm	415	400
Высота складки h , мм Fold's height h , mm	169	151
Угол наклона стенки α Pitch (declination) α	39,1°	43,3°
Ширина основания b_f , мм Base width b_f , mm	—	54



Рис. 2. Опалубочные формы: *a* — треугольная складка; *b* — трапецидальная складка

Fig. 2. Molds: *a* — triangular fold; *b* — trapezoidal fold

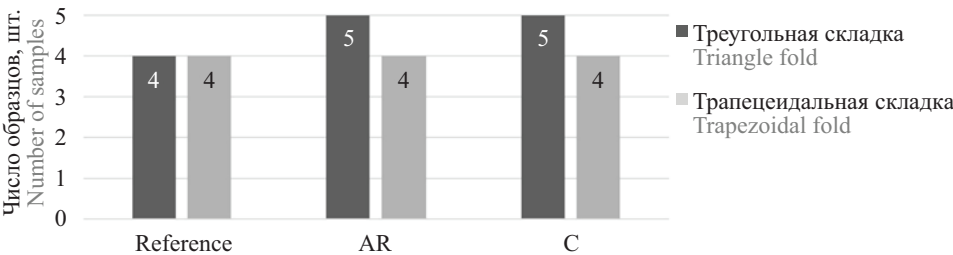


Рис. 3. Образцы складок для испытаний: reference — образцы без армирования; AR — армированные сеткой из щелочестойкого стекловолокна; C — армированные сеткой из углеродного волокна

Fig. 3. Tested folded elements: reference — non-reinforced specimens; AR — AR-glass textile reinforced specimens; C — carbon textile reinforced specimens

г. Лобня, Россия) на основе модифицированных поликарбоксилатных эфиров. Производителем заявлено соответствие добавки ТУ 2493-009-13613997–2011. Соотношение компонентов для замешивания 1 л бетонной смеси приведено в табл. 2.

После бетонирования образцы хранились в течение 28 дней во влажной среде для набора прочности бетона. После снятия опалубок было отбраковано 4 поврежденных образца: 1 треугольная складка без армирования и 3 трапецидальных складки каждого вида. Итоговый состав экспериментальных образцов приведен на рис. 3.

Армирующие полотна из высокопрочных ровингов

Образцы складок армировались основовязаными полотнами из щелочестойких стеклянных (AR) и углеродных (C) ровингов. Полотна представляли собой сетку с квадратными ячейками размером 6 × 6 мм. Для армирования образцов из полотен вырезались отрезки шириной 50 мм и длиной, соответствующей развернутой длине складчатого сечения по центральной оси. Армирующие полотна для складок со стеклянным армированием включали по 5 стеклянных ровингов. В армирующие полотна

для складок с углеродным армированием входило по 3 углеродных ровинга и 2 стеклянных ровинга. Перед бетонированием образцов армирующие полотна были обработаны жидким стеклом (силикатом натрия). Обработка ровингов жидким стеклом придает армирующим каркасам пространственную жесткость, а также улучшает прочностные свойства готового композита [32–35]. Основные свойства использованных стеклянных и углеродных ровингов представлены в табл. 3.

Важная характеристика армирующих сеток — коэффициент сетчатого армирования, который вычисляется как отношение площади армирования к площади всего сечения бетонного элемента по формуле (1). В сортаментах и нормативной литературе коэффициенты сетчатого армирования зачастую приводятся в виде удельных значений для сечения толщиной 10 мм:

$$\mu_m = \frac{A_m}{A},$$

(1)

где A_m — площадь сечения всех ровингов, включенных в сечение; A — площадь сечения элемента.

Табл. 2. Состав бетонной смеси на 1 л

Table 2. Concrete mix components per 1 litre

Портландцемент М400, г Portland cement M400, g	Кварцевый песок, г Silica sand, g	Пластификатор, г Plasticizer, g	Вода, г Water, g	Суммарный объем, л Total volume, l
687	1253	7	253	1

Табл. 3. Основные свойства армирующих ровингов [19]

Table 3. Main properties of textile reinforcing rovings [19]

Тип ровинга Roving type	Линейная плотность, тек Linear density, tex	Прочность на растяжение, МПа Tensile strength, MPa	Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa	Удлинение при максимальной нагрузке, % Elongation at max load, %
Стекланный (AR) Alkali-resistant glass	2400	914,1	66,5	1,74
Углеродный (C) Carbon	1600	2093	173	1,50



Рис. 4. Кубик из мелкозернистого бетона после испытания на сжатие

Fig. 4. Fine-grain concrete specimen after the compression test

В данной работе основную нагрузку воспринимают волокна, расположенные в сечениях, совпадающих с продольной осью (осью симметрии) складки. Такие сечения являются прямоугольниками с высотой $t = 10$ мм и шириной $b = 50$ мм, как указано выше. Соответственно, площади этих сечений равны $A = 500$ мм². Для складок, армированных только стекланными ровингами, коэффициент сетчатого армирования составлял $\mu_g = 0,0083$. Для складок, армированных углеродными и стекланными ровингами, коэффициент армирования углеродными ровингами — $\mu_c = 0,0082$.

Испытание кубиков на сжатие

Для проверки прочности использованной бетонной смеси из нее были изготовлены кубики с размером стороны 100 мм и испытаны на разрушение при сжатии. Испытание на сжатие проводилось в соответствии с положениями ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Образцы нагружались на гидравлическом прессе Amsler 1413 с возможностью нагружения образцов до 300 кН. Разрушенный образец в испытательной машине изображен на рис. 4.

Прочность бетона при сжатии рассчитана по формуле:

$$\sigma_{сж} = \alpha \frac{F}{A_k}, \tag{2}$$

где α — масштабный коэффициент, для кубов с размером ребра 100 мм $\alpha = 0,95$; F — разрушающая нагрузка; A — площадь рабочего сечения образца.

Площадь сечений образцов рассчитана по обмерам образцов, проведенным штангенциркулем перед испытанием на сжатие.

Испытание складок

На настоящий момент отсутствует нормативно-технический документ, регламентирующий лабораторные или натурные испытания складчатых конструкций. Расчеты в основном ведутся аналитически. Может быть применено конечно-элементное моделирование для прогнозирования конструктивного поведения конструкций, как указано в трудах [25, 36]. В научной литературе не так много публикаций, описывающих именно конструктивные свойства складок из текстильно-армированного бетона. Взаимосвязь между общепринятыми способами расчета и фактическим поведением конструкций под нагрузкой требует детального рассмотрения.

Важным фактором, влияющим на результат испытаний складок на разрушение, служит схема закрепления складки при испытании. В научно-технической литературе, посвященной расчету складок, часто используется схема закрепления, приведенная на рис. 5. В частности, эта схема представлена на рис. 9.5 СП 387.1325800.2018. Крайние волны многоволновой конструкции рассматриваются как жестко заделанные консоли. Для средних волн принимается, что их продольные края не перемещаются в горизонтальной плоскости

Как видно из рис. 5, края складки ограничены в перемещении по горизонтальной оси. Действительно, работая под нагрузкой в реальной конструкции, края складок будут ограничены от такого перемещения соседними складками. Именно эта особенность, возникновение так называемого «распора» в складчатой многоволновой конструкции, и способствует достижению тонкостенной облегченной складчатой конструкцией жесткости и прочности, сравнимой с характеристиками монолитной плиты покрытия. При ограничении краев складки от перемещения по горизонтали иначе распределяются и моменты, действующие на сечение складки, что продемонстрировано на рис. 6.

Таким образом, для испытаний складок на разрушение необходимо ограничить края складок от перемещения, чтобы воссоздать эксплуатационные усло-

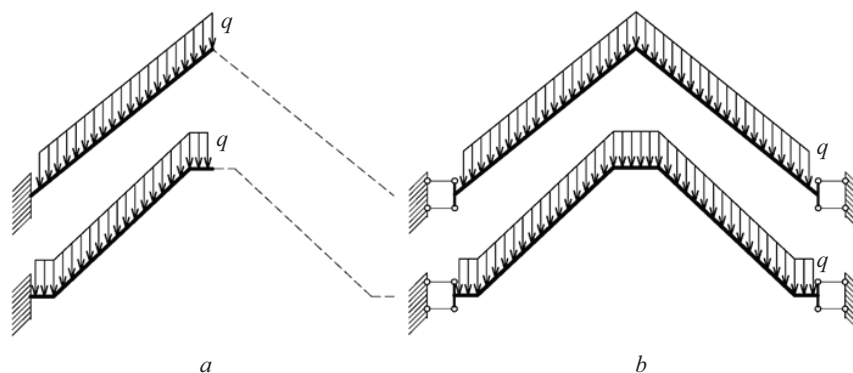


Рис. 5. Схема расчета складок в многоволновых складчатых оболочках: *a* — для крайней складки; *b* — для средней складки

Fig. 5. Design diagram of a multiwave folded plate shell: *a* — of an outer fold; *b* — for a middle fold

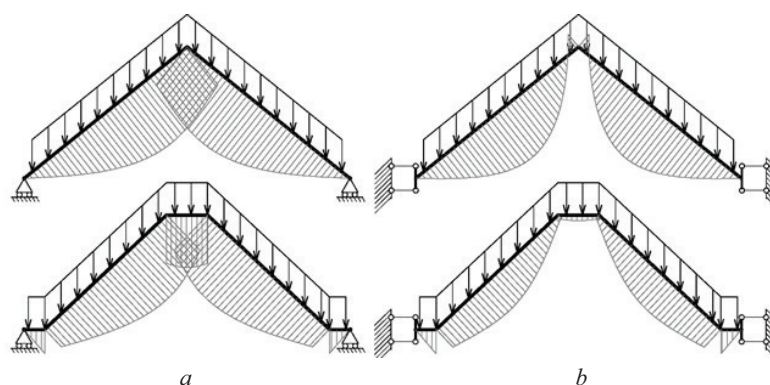


Рис. 6. Схема распределения моментов в сечении складки: *a* — при шарнирно закрепленных краях складки; *b* — при закреплении краев складки от перемещения по горизонтальной оси

Fig. 6. Bending moment diagrams for triangle and trapezoidal folds: *a* — no movement limitation along the horizontal axis; *b* — limited movement along the horizontal axis

вия работы конструктивных элементов. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 5965 на гидравлическом прессе Amsler 1413 с возможностью приложения нагрузки до 60 кН. Общий вид образца на испытательной установке приведен на рис. 7.

В научно-технической литературе складки, как правило, рассматриваются как равномерно нагруженные по верхней поверхности конструкции. Эта модель

нагружения образцов была технологически трудноосуществимой. Как видно из рис. 6 и 7, в данной серии экспериментов рабочий поршень испытательной машины воздействовал на верхний гребень складки, создавая распределенную нагрузку: линейно распределенную для треугольных складок и распределенную по площади для трапецидальных складок.

В ходе калибровки экспериментальных машин для нагружения образцов и регулировки условий за-

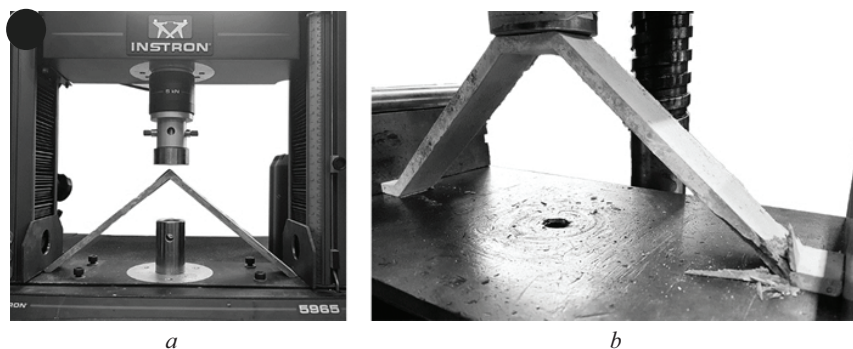


Рис. 7. Общий вид испытания на установке: *a* — Instron 5965; *b* — Amsler 1413

Fig. 7. The test setup for the testing of folds: *a* — Instron 5965 testing machine; *b* — Amsler 1413 testing machine

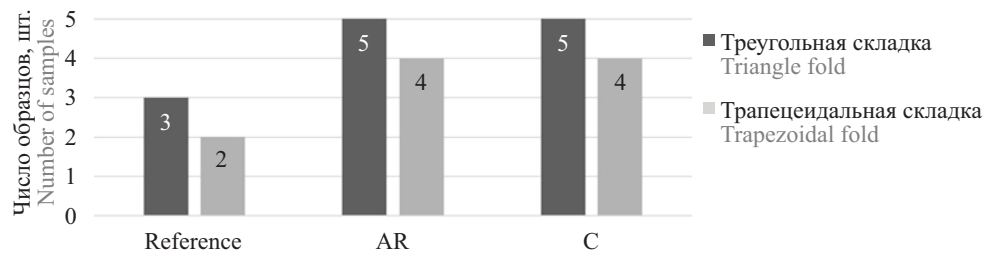


Рис. 8. Итоговый состав образцов складок перед испытаниями: reference — образцы без армирования; AR — армированные сеткой из щелочестойкого стекловолокна; C — армированные сеткой из углеродного волокна

Fig. 8. Number of the tested folded elements excluding the broken ones: reference — non-reinforced specimens; AR — AR-glass textile reinforced specimens; C — carbon textile reinforced specimens

крепления образцов было разрушено 3 неармированных образца без регистрации результата разрушения. Итоговый состав образцов складок перед испытанием приведен на рис. 8.

Нагружение образцов производилось с плавным возрастанием нагрузки до разрушения образца, т.е. до наступления первой группы предельных состояний.

Испытание поперечных сечений складок на изгиб

После разрушения образцов складок при испытании на сжатие их наклонные стенки остались по большей части неразрушенными. Поэтому было принято решение провести проверочные испытания элементов из текстильно-армированного бетона на трехточечный изгиб на универсальной испытательной машине Instron 5965. Неразрушенные элементы образцов складок помещались на испытательную установку в соответствии со схемой на рис. 9, а. Расстояние между опорами составляло $l_n = 150$ мм. Нагружение происходило с постоянной скоростью 1 мм/мин. Вид типового образца перед испытанием приведен на рис. 9, б.

Нагружение образца продолжалось до его полного разрушения. Напряжение при изгибе вычислялось по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_z}, \tag{3}$$

где M_{max} — максимальный момент в однопролетной балке длиной l , определяется по формуле (4):

$$M_{\text{max}} = \frac{Fl}{4}; \tag{4}$$

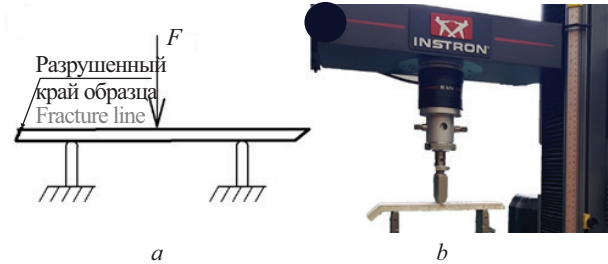


Рис. 9. Испытание образцов из текстильно-армированного бетона на изгиб: а — схема нагружения; б — вид образца перед испытанием

Fig. 9. Three-point bending test of textile-reinforced concrete specimens: а — loading diagram; б — testing general view

W_z — момент сопротивления сечения шириной b и высотой h , вычисляется по формуле (5):

$$W_z = \frac{bh^2}{6}. \tag{5}$$

После преобразований формула (3) примет вид:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_z} = \frac{Fl/4}{bh^2/6} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{bh^2}.$$

При рассмотрении результатов испытаний образцов на изгиб следует помнить, что испытания проводились на элементах уже разрушенных конструкций. Следовательно, хотя сами образцы могут выглядеть целыми, армирующие волокна в них уже претерпевали растягивающую нагрузку, а также возможно снижение сцепления армирующих ровингов с бетонной матрицей после предыдущего нагружения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прочность мелкозернистого бетона

Результаты испытаний кубиков на сжатие сведены в табл. 4.

Поскольку данное исследование не сконцентрировано на определении прочности мелкозернистого бетона, было изготовлено всего 2 стандартных кубика для испытаний на сжатие. Данные результаты не позволяют статистически достоверно судить о прочности бетона. Тем не менее эти результаты согласовываются с предыдущими результатами испытаний кубиков из мелкозернистого бетона такого же

Табл. 4. Результаты испытаний кубиков на сжатие

Table 4. Fine-grain concrete compression test results

Номер образца Specimen no.	Размеры, мм Dimensions, mm	Площадь поперечного сечения A , м ² Cross-sectional area A , m ²	Нагрузка при разрушении, Н Breaking force, N	Прочность бетона, МПа Strength of concrete, MPa
1	100,4 × 100,2 × 93,25	0,01006	234 000	22,10
2	100,2 × 101,0 × 93,6	0,01012	299 000	28,07

состава, представленными в работе [37]. Средняя прочность такого бетона на сжатие по данным предыдущих испытаний составляет 20,1 МПа, что ниже прочности кубиков, испытанных в настоящем исследовании. Разрушение кубика бетона в испытательной установке показано на рис. 4.

Прочность складок из текстильно-армированного бетона

Диаграммы «нагрузка – перемещение», полученные при испытаниях складок, представлены на рис. 10.

Диаграммы нагружения складок показывают, что трапецидалные складки в общем случае являются более жесткими (красная, оранжевая, зеленая линии). Треугольные складки, наоборот, — более податливы, а на диаграммах нагружения треугольных складок присутствует довольно длинное «плато текучести», на котором нагрузка почти не изменяется.

Разрушающие нагрузки для образцов складок и средние значения разрушающих нагрузок для групп образцов приведены на рис. 11.

Результаты испытаний в табличной форме показаны в табл. 5.

Прочность складок трапецидальной формы с различным армированием соответствует предварительным ожиданиям — наиболее прочными ока-

зываются складки, армированные более прочными углеродными ровингами, а наименее прочными — складки без армирования. Неожиданными, наоборот, стали результаты испытаний треугольных складок: наибольшие усилия зарегистрированы при разрушении складок без армирования, а наименьшие — при разрушении складок, армированных углеродными ровингами. Предварительно это явление может быть объяснено тем, что армирующая сетка при бетонировании треугольных складок оказалась в сжимаемой зоне складок. Получается, что армирующие ровинги не работали эффективно, так как не испытывали растягивающих напряжений, и вместе с этим сократили активную площадь бетона в сжимаемом сечении. Детальное изучение этого явления, а также построение взаимосвязи результатов экспериментальных испытаний с расчетной моделью планируется провести в дальнейших исследованиях.

По результатам испытаний образцов были составлены схемы основных районов трещинообразования и разрушения у треугольных и трапецидальных складок (рис. 12). Армирующие волокна в местах трещин образцов были разорваны полностью или утончены, что сигнализирует об эффективной работе армирующих ровингов на изгиб.

Стоит отметить, что основным отличием армированных образцов от неармированных является

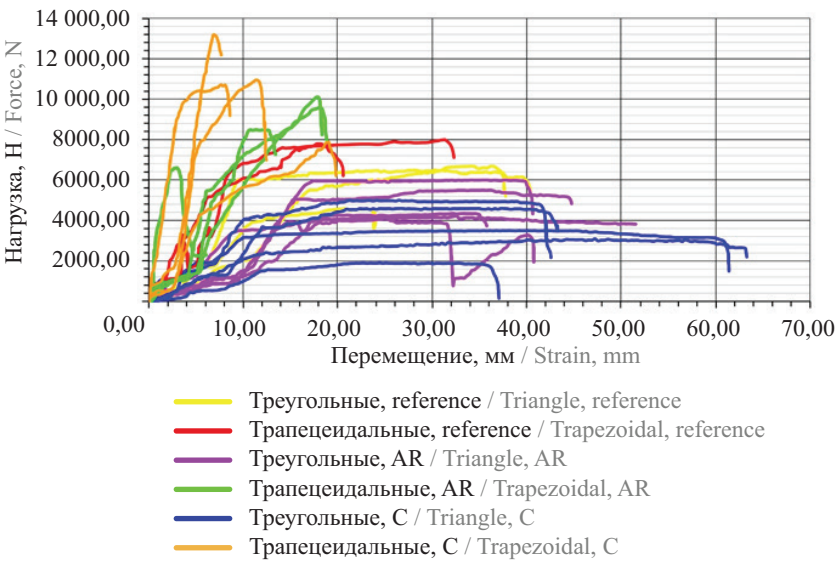


Рис. 10. Диаграммы испытания складок

Fig. 10. Fold test diagrams

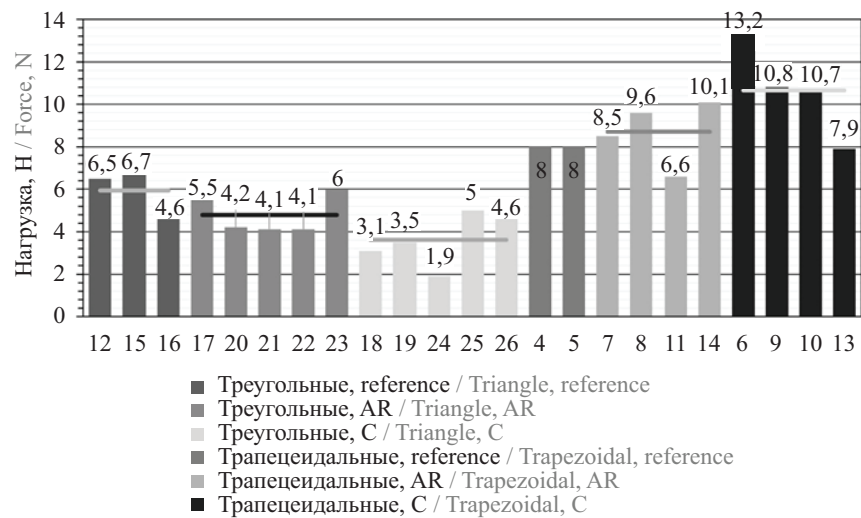


Рис. 11. Разрушающие нагрузки для образцов складок
Fig. 11. Ultimate breaking load for tested folded elements

характер разрушения. При отсутствии армирования хрупкая бетонная матрица разрушается с полным отказом конструкции. При наличии армирующей сетки конструкция сохраняет остаточную несущую способность даже после разрушения бетонной матрицы, что предотвращает обрушение конструкции.

Прочность текстильно-армированного бетона на изгиб

Как видно на рис. 13, по большей части разрушение образцов происходило на складках конструкций, что позволило использовать оставшиеся плоские элементы складок для испытаний на изгиб. На рис. 13

Табл. 5. Результаты испытаний образцов складок
Table 5. Test results of the fold specimens

Форма складки Type of the fold	Армирование Reinforcement	Номер образца Specimen no.	Разрушающая нагрузка, кН Breaking force, kN	Средняя разрушающая нагрузка для группы, кН Average breaking force, kN
Треугольник Triangle	—	12	6,5	5,9
		15	6,7	
		16	4,6	
	AR	17	5,5	4,8
		20	4,2	
		21	4,1	
		22	4,1	
		23	6	
	C	18	3,1	3,6
		19	3,5	
		24	1,9	
		25	5	
		26	4,6	
Трапеция Trapezoidal	—	4	8	8,0
		5	8	
	AR	8	8,5	8,7
		9	9,6	
		11	6,6	
		14	10,1	
	C	6	13,2	10,7
		7	10,8	
		10	10,7	
		13	7,9	

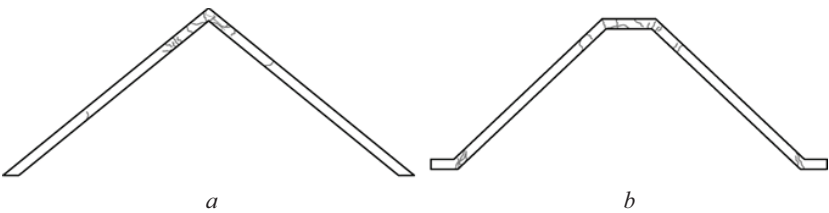


Рис. 12. Разрушающие трещины в складках: *a* — треугольной формы; *b* — трапецидальной формы

Fig. 12. Patterns of crack formation: *a* — for triangle folded elements; *b* — for trapezoidal folded elements

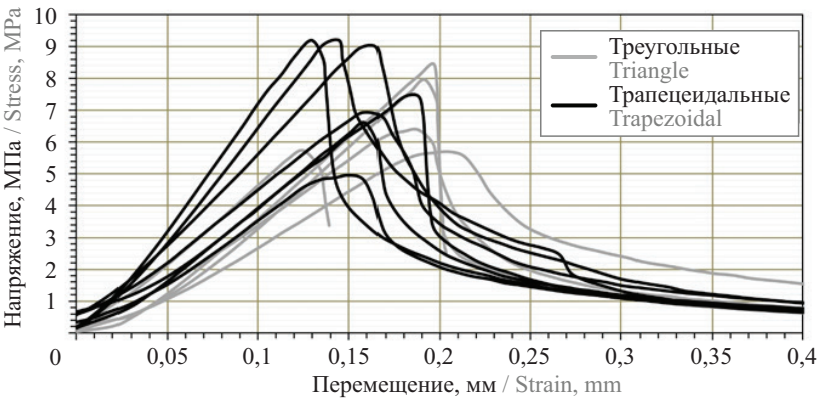


Рис. 13. Зависимость напряжения в образцах от перемещения при испытании неармированных плоских элементов на изгиб

Fig. 13. Stress-strain curves for three-point bending test for plain non-reinforced elements

приведены диаграммы «напряжение – перемещение» для неармированных образцов складок. Серым цветом показаны результаты испытаний элементов треугольных складок, черным — кривые, полученные для образцов трапецидальных складок.

Как видно из рис. 13, нарастание напряжения в неармированных элементах происходило по схожим сценариям, о чем можно судить по схожести диаграмм. Значения пиковых напряжений лежали в диапазоне от 4,96 до 9,19 МПа. Диаграммы «напря-

Табл. 6. Результаты испытаний тонких элементов на изгиб

Table 6. Three-point bending test numerical results for plain elements

Тип армирования Reinforcement type	Форма складки Fold type	Количество образцов, шт. Number of specimens	Пиковое напряжение, МПа Peak stress, MPa		Среднее значение пикового напряжения, МПа Average peak stress, MPa	Среднее значение по типу армирования, МПа Average value by type of reinforcement, MPa
			максимальное max	минимальное min		
—	Треугольная Triangle	5	8,46	5,7	6,85	7,29
	Трапеция Trapezoidal	7	9,19	4,96	7,61	
AR	Треугольная Triangle	8	26,46	6,16	13,42	9,33
	Трапеция Trapezoidal	6	10,8	6,15	7,6	
C	Треугольная Triangle	10	24,76	8,11	14,3	15,4
	Трапеция Trapezoidal	11	37,08	5,95	16,4	

жение – перемещение» для армированных элементов имели меньшую повторяемость, поэтому необходим дополнительный анализ для демонстрации и обсуждения диаграмм для текстильно-армированных элементов.

Результаты испытаний всех элементов на изгиб представлены в табл. 6.

По результатам испытаний выявлено, что наиболее прочными оказались образцы, армированные углеродными ровингами, наименее прочными — неармированные образцы, что соответствует ожидаемым результатам исследования. Неармированные образцы в данном исследовании демонстрируют более высокую прочность по сравнению с образцами из бетона того же состава, рассмотренными в предыдущих исследованиях [37, 38]. Средняя прочность на изгиб предыдущих аналогичных образцов составила 4,83 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты.

Были запроектированы треугольная и трапециевидная складки из текстильно-армированного бетона толщиной сечения 10 мм, высотой 150 мм и длиной складки 400 мм. По запроектированным схемам изготовлено 30 образцов складок с различным армированием: 10 контрольных образцов без армирования, 10 образцов, армированных высокомодульными щелочестойкими стеклянными ровингами, и 10 образцов, армированных высокомодульными углеродными ровингами.

Образцы складок испытаны на разрушение при сжатии с закреплением краев складок от перемещения в горизонтальной плоскости. Средняя разрушающая нагрузка для треугольных складок

составила 5,9 кН для неармированных образцов, 4,8 кН для AR-армированных образцов, и 3,6 кН для С-армированных образцов. Для трапециевидных складок средняя разрушающая нагрузка составила 8,0 кН для неармированных образцов, 8,7 кН для AR-армированных образцов, и 10,7 кН для С-армированных образцов. Выявлено, что более эффективной оказалась работа армирующих ровингов в сечениях трапециевидных складок.

Кубические образцы мелкозернистого бетона, из которого изготовлены складки, были испытаны на сжатие, средняя прочность бетона на сжатие составила 25,08 МПа. Плоские прямолинейные элементы складок испытаны на трехточечный изгиб. Прочность образцов на изгиб составила 7,29 МПа для неармированных образцов, 9,33 МПа для AR-армированных образцов, и 15,4 МПа для С-армированных образцов. Установлено, что в общем случае С-армирование повышает изгибную прочность элемента больше, чем AR-армирование.

Результаты данного исследования могут быть соотнесены с аналитическими расчетами и результатами конечно-элементного моделирования аналогичных сечений складок. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для разработки теории расчета большепролетных складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона.

Проектирование складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона позволит снизить материалоемкость покрытий зданий и сооружений с сохранением прочности и долговечности конструктивных элементов. Стойкость армирующих волокон к коррозии особенно актуальна для применения конструкций из текстильно-армированного бетона в России ввиду наличия во многих регионах влажного климата с частыми переходами температуры через ноль градусов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киричков И.В. Тенденции развития складчатого формообразования в современной архитектуре // Архитектура и дизайн. 2019. № 2. С. 7–16. DOI: 10.7256/2585-7789.2019.2.30833. EDN LGTSQW.
2. Van der Woerd J.D., Chudoba R., Scholzen A., Hegger J. Oricrete // Beton- und Stahlbetonbau. 2013. Vol. 108. Issue 11. Pp. 774–782. DOI: 10.1002/best.201300057
3. Valeri P., Guaita P., Baur R., Ruiz M.F., Fernández-Ordóñez D., Muttoni A. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion // Structural Concrete. 2020. Vol. 21. Issue 6. Pp. 2251–2267. DOI: 10.1002/suco.2019-00511
4. Spartali H., van der Woerd J.D., Hegger J., Chudoba R. Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb

- patterns // The 2022 Annual Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS 2022). 2022. Pp. 96–106. DOI: 10.5281/zenodo.10812858
5. Ярмош Т.С., Храбатина Н.В., Мирошник В.В. Складчатые конструкции. Перспективы развития новых форм // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 71–75. DOI: 10.12737/22829. EDN XBFADR.
6. Du W., Liu Q., Zhou Z., Uddin N. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 137. Pp. 224–230. DOI: 10.1016/j.tws.2019.01.014
7. Lee M., Mata-Falcón J., Kaufmann W. Load-deformation behaviour of weft-knitted textile reinforced con-

- crete in uniaxial tension // *Materials and Structures*. 2021. Vol. 54. Issue 6. DOI: 10.1617/s11527-021-01797-5
8. Zhu D., Bai X., Yao Q., Rahman M.Z., Li X., Yang T. et al. Effects of volume fraction and surface coating of textile yarns on the tensile performance of AR-glass textile reinforced concrete // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 71. P. 106420. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106420
9. Kapsalis P., Tysmans T., Hemelrijck D.V., Triantafillou T. State-of-the-art review on experimental investigations of textile-reinforced concrete exposed to high temperatures // *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5. Issue 11. P. 290. DOI: 10.3390/jcs5110290
10. Alma'aitah M., Ghiassi B. Development of cost-effective low carbon hybrid textile reinforced concrete for structural or repair applications // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 341. P. 127858. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127858
11. Kurban M., Babaarslan O., Çağatay İ.H. Investigation of the flexural behavior of textile reinforced concrete with braiding yarn structure // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 334. P. 127434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127434
12. Nikravan A., Aydoğan O.G., Dittel G., Scheurer M., Bhat S., Ozyurt N. et al. Implementation of continuous textile fibers in 3d printable cementitious composite // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Pp. 1243–1252. DOI: 10.1007/978-3-031-32519-9_126
13. Zhang M., Deng M. Tensile behavior of textile-reinforced composites made of highly ductile fiber-reinforced concrete and carbon textiles // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. P. 104824. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104824
14. Preinstorfer P., Yanik S., Kirnbauer J., Lees J.M., Robisson A. Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish // *Composite Structures*. 2023. Vol. 312. P. 116859. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116859
15. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber optic sensors embedded in textile-reinforced concrete for smart structural health monitoring: a review // *Sensors*. 2021. Vol. 21. Issue 15. P. 4948. DOI: 10.3390/S21154948
16. Becks H., Bielak J., Camps B., Hegger J. Application of fiber optic measurement in textile-reinforced concrete testing // *Structural Concrete*. 2022. Vol. 23. Issue 4. Pp. 2600–2614. DOI: 10.1002/suco.202100252
17. Orłowsky J., Beßling M., Kryzhanovskiy V. Prospects for the use of textile-reinforced concrete in buildings and structures maintenance // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 189. DOI: 10.3390/buildings13010189
18. Paul S., Gettu R., Arnepalli D.N., Samanthula R. Experimental evaluation of the durability of glass Textile-Reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 406. P. 133390. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133390
19. Столяров О.Н. Тонкостенные строительные конструкции из текстильно-армированного бетона : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2023. 334 с. EDN LYPMCK.
20. Alma'aitah M., Ghiassi B., Dalalbashi A. Durability of textile reinforced concrete: existing knowledge and current gaps // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 6. P. 2771. DOI: 10.3390/app11062771
21. Botelho Goliath K., Daniel D.C., de A. Silva F. Flexural behavior of carbon-textile-reinforced concrete I-section beams // *Composite Structures*. 2021. Vol. 260. P. 113540. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113540
22. Friese D., Scheurer M., Hahn L., Gries T., Cherif C. Textile reinforcement structures for concrete construction applications : a review // *Journal of Composite Materials*. 2022. Vol. 56. Issue 26. Pp. 4041–4064. DOI: 10.1177/00219983221127181
23. Stüttgen S., Akpanya R., Beckmann B., Chudoba R., Robertz D., Niemeyer A.C. Modular construction of topological interlocking blocks — an algebraic approach for resource-efficient carbon-reinforced concrete structures // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 2565. DOI: 10.3390/buildings13102565
24. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Vacuum-assisted die casting method for the production of filigree textile-reinforced concrete structures // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 2641. DOI: 10.3390/buildings-13102641
25. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical analysis of textile reinforced concrete shells: force interaction and failure types // *CivilEng*. 2024. Vol. 5. Issue 1. Pp. 224–246. DOI: 10.3390/civileng5010012
26. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. The numerical analysis of textile reinforced concrete shells: basic principles // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 5. P. 2140. DOI: 10.3390/app14052140
27. Донцова А.Е., Столяров О.Н. Проектирование и изготовление прототипов тонкостенных бетонных пространственных конструкций покрытий для экспериментальных исследований // *Современные строительные материалы и технологии*. 2023. С. 66–71. EDN JQSAXP.
28. Донцова А.Е., Столяров О.Н. Облегченные складчатые конструкции из текстильно-армированного бетона // *Неделя науки ИСИ : сб. мат. Всерос. конф.* 2023. С. 391–393. EDN FBKXFT.
29. Донцова А.Е., Ольшевский В.Я., Столяров О.Н. Композитные трубы из текстильно-армированного бетона в инженерных системах зданий и сооружений // *Неделя науки ИСИ : мат. Всерос. конф.* 2021. С. 10–12. EDN IGCRCF.
30. Донцова А.Е., Ольшевский В.Я., Столяров О.Н. Мониторинг утечек воды в бетонных конструкциях с использованием встроенных датчиков на основе углеродных нитей // *Строительство и техногенная безопасность*. 2022. № 26 (78). С. 71–80. EDN HGBALR.
31. Stolyarov O.N., Dontsova A.E., Kozinets G.L. Structural behavior of concrete arches reinforced with

glass textiles // Magazine of Civil Engineering. 2023. № 6 (122). DOI: 10.34910/MCE.122.2. EDN SBCQRH.

32. Glowania M., Weichold O., Hojczyk M., Seide G., Gries T. Neue Beschichtungsverfahren für PVA-Zement-Composite in textilbewehrtem Beton. 2009.

33. Dilthey U. Application of polymers in textile reinforced concrete: From the interface to construction elements // ICTRC'2006 — 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete. 2006. Pp. 55–64. DOI: 10.1617/2351580087.006

34. Dilthey U., Schleser M. Composite Improvement of TRC by Polymeric Impregnation of the Textiles // International Symposium Polymers in Concrete. 2006. P. 446.

35. Quadflieg T., Leimbrink S., Gries T., Stolyarov O. Effect of coating type on the mechanical performance

of warp-knitted fabrics and cement-based composites // Journal of Composite Materials. 2018. Vol. 52. Issue 19. Pp. 2563–2576. DOI: 10.1177/0021998317750003

36. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical Analysis of TRC Shells — Force Interaction and Failure Types. 2023. DOI: 10.20944/preprints202312.0700.v1

37. Koriakovtseva T.A., Dontsova A.E., Nemovala D.V. Mechanical and thermal properties of an energy-efficient cement composite incorporating silica aerogel // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 4. P. 1034. DOI: 10.3390/buildings14041034

38. Коряковцева Т.А., Заборова Д.Д. Испытания экологического бетонного композита на основе растительной добавки и угольного фильтра // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № 30 (82). С. 47–57. EDN TVFVAF.

Поступила в редакцию 16 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 23 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Анна Евгеньевна Донцова — ассистент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; anne.dontsoova@ya.ru;

Олег Николаевич Столяров — доктор технических наук, доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; stolyarov_on@spbstu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kirichkov I. The development trends of folded morphogenesis in modern architecture. *Architecture and Design*. 2019; 2:7-16. DOI: 10.7256/2585-7789.2019.2.30833. EDN LGTSQW. (rus.).

2. Van der Woerd J.D., Chudoba R., Scholzen A., Hegger J. Oricrete. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2013; 108(11):774-782. DOI: 10.1002/best.201300057

3. Valeri P., Guaita P., Baur R., Ruiz M.F., Fernández-Ordóñez D., Muttoni A. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion. *Structural Concrete*. 2020; 21(6):2251-2267. DOI: 10.1002/suco.201900511

4. Spartali H., van der Woerd J.D., Hegger J., Chudoba R. Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb patterns. *The 2022 Annual Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS 2022)*. 2022; 96-106. DOI:10.5281/zenodo.10812858

5. Yarmosh T., Khrabatina N., Miroshnichenko V. The folded structure. Prospects for the development of new forms. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*. 2016; 12:71-75. DOI: 10.12737/22829. EDN XBFADR. (rus.).

6. Du W., Liu Q., Zhou Z., Uddin N. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures. *Thin-Walled Structures*. 2019; 137:224-230. DOI: 10.1016/j.tws.2019.01.014

7. Lee M., Mata-Falcón J., Kaufmann W. Load-deformation behaviour of weft-knitted textile reinforced concrete in uniaxial tension. *Materials and Structures*. 2021; 54(6). DOI: 10.1617/s11527-021-01797-5

8. Zhu D., Bai X., Yao Q., Rahman M.Z., Li X., Yang T. et al. Effects of volume fraction and surface coating of textile yarns on the tensile performance of AR-glass textile reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023; 71:106420. DOI: 10.1016/j.job.2023.106420

9. Kapsalis P., Tysmans T., Hemelrijck D.V., Triantafillou T. State-of-the-Art Review on Experimental Investigations of Textile-Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures. *Journal of Composites Science*. 2021; 5(11):290. DOI: 10.3390/jcs5110290

10. Alma'aitah M., Ghiassi B. Development of cost-effective low carbon hybrid textile reinforced concrete for structural or repair applications. *Construction and Building Materials*. 2022; 341:127858. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127858

11. Kurban M., Babaarslan O., Çağatay İ.H. Investigation of the flexural behavior of textile reinforced concrete with braiding yarn structure. *Construction and Building Materials*. 2022; 334:127434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127434
12. Nikravan A., Aydogan O.G., Dittel G., Scheurer M., Bhat S., Ozyurt N. et al. Implementation of Continuous Textile Fibers in 3D Printable Cementitious Composite. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 1243-1252. DOI: 10.1007/978-3-031-32519-9_126
13. Zhang M., Deng M. Tensile behavior of textile-reinforced composites made of highly ductile fiber-reinforced concrete and carbon textiles. *Journal of Building Engineering*. 2022; 57:104824. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104824
14. Preinstorfer P., Yanik S., Kirnbauer J., Lees J.M., Robisson A. Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish. *Composite Structures*. 2023; 312:116859. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116859
15. Alwis L., Bremer K., Roth B. Fiber Optic Sensors Embedded in Textile-Reinforced Concrete for Smart Structural Health Monitoring : a Review. *Sensors*. 2021; 21(15):4948. DOI: 10.3390/S21154948
16. Becks H., Bielak J., Camps B., Hegger J. Application of fiber optic measurement in textile-reinforced concrete testing. *Structural Concrete*. 2022; 23(4):2600-2614. DOI: 10.1002/suco.202100252
17. Orłowsky J., Beßling M., Kryzhanovskiy V. Prospects for the Use of Textile-Reinforced Concrete in Buildings and Structures Maintenance. *Buildings*. 2023; 13(1):189. DOI: 10.3390/buildings13010189
18. Paul S., Gettu R., Arnepalli D.N., Samanthula R. Experimental evaluation of the durability of glass Textile-Reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 406:133390. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133390
19. Stolyarov O.N. *Thin-walled building structures made of textile-reinforced concrete : thesis of doctor of technical sciences*. St. Petersburg, 2023; 334. EDN LYPMCK. (rus.).
20. Alma'aitah M., Ghiassi B., Dalalbashi A. Durability of Textile Reinforced Concrete: Existing Knowledge and Current Gaps. *Applied Sciences*. 2021; 11(6):2771. DOI: 10.3390/app11062771
21. Botelho Goliath K., Daniel D.C., de A. Silva F. Flexural behavior of carbon-textile-reinforced concrete I-section beams. *Composite Structures*. 2021; 260:113540. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113540
22. Friese D., Scheurer M., Hahn L., Gries T., Cherif C. Textile reinforcement structures for concrete construction applications : a review. *Journal of Composite Materials*. 2022; 56(26):4041-4064. DOI: 10.1177/00219983221127181
23. Stüttgen S., Akpanya R., Beckmann B., Chudoba R., Robertz D., Niemeyer A.C. Modular Construction of Topological Interlocking Blocks — an Algebraic Approach for Resource-Efficient Carbon-Reinforced Concrete Structures. *Buildings*. 2023; 13(10):2565. DOI: 10.3390/buildings13102565
24. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Vacuum-Assisted Die Casting Method for the Production of Filigree Textile-Reinforced Concrete Structures. *Buildings*. 2023; 13(10):2641. DOI: 10.3390/buildings13102641
25. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Force Interaction and Failure Types. *CivilEng*. 2024; 5(1):224-246. DOI: 10.3390/civileng5010012
26. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. The Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Basic Principles. *Applied Sciences*. 2024; 14(5):2140. DOI: 10.3390/app14052140
27. Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Design and manufacturing of prototypes of thin-walled concrete spatial structures for experimental research. *Modern Construction Materials and Technologies*. 2023; 66-71. EDN JQSAXP. (rus.).
28. Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Lightweight folded structures made of textile-reinforced concrete. *ISI Science Week : collection of materials of the All-Russian conference*. 2023; 391-393. EDN FBKXFT. (rus.).
29. Dontsova A.E., Ol'shevskiy V.Ya., Stolyarov O.N. Composite pipes made of textile-reinforced concrete in engineering systems of buildings and structures. *ISI Science Week : materials of the All-Russian conference*. 2021; 10-12. EDN IGCRCF. (rus.).
30. Dontsova A.E., Olshevskiy V.Ya., Stolyarov O.N. Water infiltration detection of concrete structures using integrated carbon fiber sensors. *Construction and Industrial Safety*. 2022; 26(78):71-80. EDN HGBALR. (rus.).
31. Stolyarov O.N., Dontsova A.E., Kozinets G.L. Structural behavior of concrete arches reinforced with glass textiles. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 6(122). DOI: 10.34910/MCE.122.2. EDN SBCQRH.
32. Glowania M., Weichold O., Hojczyk M., Seide G., Gries T. *Neue Beschichtungsverfahren für PVA-Zement-Composite in textilbewehrtem Beton*. 2009.
33. Diltthey U. Application of polymers in textile reinforced concrete: From the interface to construction elements. *ICTRC'2006 — 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete*. 2006; 55-64. DOI: 10.1617/2351580087.006
34. Diltthey U., Schleser M. Composite Improvement of TRC by Polymeric Impregnation of the Textiles. *International Symposium Polymers in Concrete*. 2006; 446.
35. Quadflieg T., Leimbrink S., Gries T., Stolyarov O. Effect of coating type on the mechanical performance of warp-knitted fabrics and cement-based composites. *Journal of Composite Materials*. 2018; 52(19):2563-2576. DOI: 10.1177/0021998317750003
36. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. *Numerical Analysis of TRC Shells — Force Interaction and Failure Types*. 2023. DOI: 10.20944/preprints202312.0700.v1

37. Koriakovtseva T.A., Dontsova A.E., Nemova D.V. Mechanical and Thermal Properties of an Energy-Efficient Cement Composite Incorporating Silica Aerogel. *Buildings*. 2024; 14(4):1034. DOI: 10.3390/buildings14041034

38. Koriakovtseva T.A., Zaborova D.D. Study of an ecological concrete composite based on plant additive and charcoal filter. *Construction and Industrial Safety*. 2023; 30(82):47-57. EDN TVFVAF. (rus.).

Received September 16, 2024.

Adopted in revised form on September 23, 2024.

Approved for publication on October 28, 2024.

B I O N O T E S: **Anna E. Dontsova** — Assistant of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering of the Civil Engineering Institute; **Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 litera B, Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation; anne.dontsoova@ya.ru;

Oleg N. Stolyarov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering of the Civil Engineering Institute; **Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 litera B, Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation; stolyarov_on@spbstu.ru.

*Contribution of the authors: all of the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interests.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245

Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический отклик системы

Валерия Александровна Пшеничкина, Станислав Юрьевич Иванов,
Сергей Сергеевич Рекунов, Алексей Александрович Чураков

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в инженерной практике для оценки совместной динамической работы зданий с грунтовым основанием применяется модель штампа, лежащего на упругом однородном основании. Наличие слоев с резко отличающимися жесткостями, а также порядок их расположения в грунтовой толще приводит к значительным изменениям спектра резонансных частот и величины динамического отклика. Поэтому для корректной оценки резонансных процессов, возникающих при совместных колебаниях сооружения и основания, важно учитывать неоднородность и слоистую структуру грунтового основания. Цель исследования — анализ реакции системы «сооружение – многослойное основание» в зависимости от соотношений их жесткостей, а также в сопоставлении результатов, полученных при моделировании многослойного и эквивалентного однородного основания.

Материалы и методы. Используется расчетная модель горизонтальной слоистой среды. Рассматривается сооружение как элемент слоистой системы с приведенными жесткостными характеристиками. Сейсмическая нагрузка в виде вертикальной распространяющейся сдвиговой волны моделируется стационарным случайным процессом. Для анализа применяются амплитудно-частотные характеристики системы в целом, а также для каждого отдельного слоя, спектральные плотности выхода и коэффициенты динамичности.

Результаты. Установлено, что при снижении жесткости здания увеличивается его вклад в общую амплитудно-частотную характеристику системы. Выполнена численная оценка изменения коэффициента динамичности при изменении параметров системы. Произведено сопоставление отклика сооружения на многослойном основании с откликом на однородном основании с эквивалентными характеристиками.

Выводы. Упрощенное представление грунта как однородного без учета его слоистой структуры снижает величину коэффициента динамичности до 30 %. Резонансные частоты системы «здание – жесткий слой – слабый слой» в основном определяются резонансными частотами слабого нижнего слоя, особенно при увеличении жесткости зданий. Аналогичная картина характерна и для однородного основания. В системе «здание – слабый слой – жесткий слой» резонансные частоты зависят от частот слоев основания, а также от собственных частот здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмическая нагрузка, система «сооружение – основание», импедансы, многослойное основание, резонансные частоты, амплитудно-частотная характеристика, свободные колебания, резонансные частоты, коэффициент динамичности, вероятностный расчет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пшеничкина В.А., Иванов С.Ю., Рекунов С.С., Чураков А.А. Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический отклик системы // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 231–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245

Автор, ответственный за переписку: Валерия Александровна Пшеничкина, vap_hm@list.ru.

Influence of the stiffness ratio of the building and the multilayer soil foundation on the seismic response of the system

Valeria A. Pshenichkina, Stanislav Yu. Ivanov, Sergey S. Rekunov, Alexey A. Churakov
Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, in engineering practice, a model of a die lying on an elastic homogeneous base is used to evaluate the joint dynamic operation of buildings with a soil base. The presence of layers with sharply different stiffness, as well as the order of their location in the soil column, leads to significant changes in the spectrum of resonant frequencies and the magnitude of the dynamic response. Therefore, it is important to take into account the inhomogeneity and layered structure of the soil foundation for a correct assessment of resonance processes arising from joint vibrations of the structure and the foundation. The purpose of the study is to analyze the reaction of the “structure – multilayer base” system depending on the ratios of their stiffness, as well as to compare the results obtained by modelling a multilayer and equivalent homogeneous base.

Materials and methods. A computational model of a horizontal layered medium is used. The structure as an element of a layered system with reduced stiffness characteristics. The seismic load in the form of a vertical propagating shear wave is modeled by a stationary random process. The amplitude-frequency characteristics of the system as a whole, as well as for each individual layer, spectral output densities and dynamic coefficients are used for analysis.

Results. It was found that with a decrease in the rigidity of the building, its contribution to the overall amplitude-frequency response of the system increases. A numerical assessment of the change in the dynamism coefficient with changes in the system parameters has been performed. A comparison was made of the response of a structure on a multilayer base with a response on a single base with equivalent characteristics.

Conclusions. The simplified representation of the soil as homogeneous, without taking into account its layered structure, reduces the value of the dynamism coefficient to 30 %. The resonant frequencies of the “building – hard layer – weak layer” system are mainly determined by the resonant frequencies of the weak lower layer, especially with an increase in the rigidity of buildings. A similar pattern is characteristic for a homogeneous base. In the “building – weak layer – hard layer” system, the resonant frequencies depend on the frequencies of the base layers, as well as on the natural frequencies of the building.

KEYWORDS: seismic load, “structure – base” system, impedances, multilayer base, resonant frequencies, amplitude-frequency response, free oscillations, resonant frequencies, dynamicity coefficient, probabilistic calculation

FOR CITATION: Pshenichkina V.A., Ivanov S.Yu., Rekunov S.S., Churakov A.A. Influence of the stiffness ratio of the building and the multilayer soil foundation on the seismic response of the system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):231-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245 (rus.).

Corresponding authors: Valeria A. Pshenichkina, vap_hm@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие сооружений с грунтовым основанием при сейсмических колебаниях представляет собой одну из ключевых тем в области сейсмостойкого проектирования. Существует множество исследований как отечественных, так и зарубежных, посвященных анализу работы сейсмостойких зданий с учетом податливости основания, однако задача еще не имеет окончательного решения. Это обусловлено сложной динамикой взаимодействия между зданием и основанием, нелинейной реакцией грунтов и конструкций при землетрясениях, а также неопределенностью исходной информации.

Геологическое строение основания каждой площадки уникально и, как правило, имеет многослойную структуру. Геологический разрез, отображающий границы между слоями в виде интерполяционных линий между соседними скважинами, лишь приблизительно отражает реальные напластования грунта. Параметры каждого слоя, включая его форму, физико-механические свойства и толщину, также имеют случайный характер. При этом сейсмический отклик системы «сооружение – основание» в значительной степени зависит от изменчивости расчетных параметров как самой системы, так и параметров землетрясения, таких как амплитуда, спектральный состав и др.

Современные программные комплексы способны решать аналогичные задачи, учитывая перечисленные факторы. Однако применение сложных и трудоемких расчетов в проектной деятельности не является целесообразным из-за неполноты и неопределенности исходных данных. Для подобных систем более эффективно применение упрощенных интегральных моделей с использованием метода Монте-Карло.

В настоящее время в инженерной практике для оценки совместной динамической работы зданий с грунтовым основанием применяется модель прямоугольного или круглого штампа, лежащего на упругом однородном основании. Для описания жесткостных и демпфирующих характеристик основания в общем случае используется система из шести пар импедансных функций [1, 2].

В работе [3] на модели круглого фундамента на однослойном основании изучалось влияние статистической изменчивости параметров грунта на динамическую реакцию сооружения. Полученные результаты показали, что при варьировании толщины слоя на 10 % и скорости поперечной волны на 20 % коэффициенты горизонтальных импедансов снижаются на 32 и 40 %, а коэффициенты импедансов качательного движения — на 12,5 и 25 %. Учет случайных свойств основания приводит к уменьшению средней реакции конструкции за счет увеличения ее демпфирования, что рассматривается как положительный аспект при проектировании сейсмостойких зданий.

Сходные результаты получены в исследовании [4], где отмечается значительное влияние изменчивости параметров основания, таких как скорость поперечной волны и толщина слоя, а также интегральных характеристик сооружения (радиус фундамента и высота расположенной на нем конструкции) на функции импеданса жесткого круглого фундамента, опирающегося на поверхность однослойного основания.

Отмечается, что при исследовании взаимодействия конструкции с основанием следует учитывать такие факторы, как пространственная неоднородность и неопределенность расчетных параметров грунта, а также его нелинейную работу во время землетрясения [5, 6]. К наиболее важным параметрам, характеризующим динамическое поведение грунта, авторы относят модуль сдвига и коэффициент затухания.

Для учета нелинейной работы грунта применяются упрощенные методы, такие как эквивалентная линейная модель [5, 6] или нелинейный статический сейсмический анализ [7].

Вместе с тем современные исследования последствий землетрясений выявили и негативные эффекты взаимодействия сооружений с основанием [8]. При сравнении нормативных расчетных спектров с фактическими спектрами отклика выявлено [9], что увеличение основного периода колебаний сооружения, вызванное взаимодействием с основанием, не всегда приводит к снижению отклика. В связи с этим преобладающая в строительном проектировании точка зрения о полезной роли учета податливо-

сти основания на реакцию сооружения рассматривается как чрезмерное упрощение, что может снизить безопасность конструкций.

В труде [10] подчеркивается различие динамического отклика сооружения на податливом и жестком основании. На примере исследования 4-, 8- и 12-этажных железобетонных зданий показано, что эффект взаимодействия особенно ярко проявляется для жестких сооружений, расположенных на слабом грунте с невысокой динамической жесткостью.

Результаты анализа сейсмической уязвимости зданий средней этажности [11] продемонстрировали, что уменьшение жесткости грунта приводит к увеличению периодов колебаний и большей сейсмической повреждаемости зданий. Для рассматриваемых объектов максимальная несущая способность может быть снижена до 15 %.

В рассмотренных работах авторы использовали модель грунта в виде однослойного основания, ограниченного коренными породами. Эта модель актуальна для грунтовой толщи с приблизительно одинаковыми динамическими характеристиками слоев.

Наличие слоев с резко отличающимися жесткостями, а также порядок их расположения в грунтовой толще приводят к значительным изменениям спектра резонансных частот и величины динамического отклика на свободной поверхности грунта [12]. Поэтому для корректной оценки резонансных процессов, возникающих при совместных колебаниях сооружения и основания, важно учитывать неоднородность и слоистую структуру грунтового основания. Для решения задачи распространения сейсмических волн через многослойные грунты в инженерной сейсмологии применяется волновая модель горизонтальной слоистой среды.

Анализ сейсмического отклика на свободной поверхности грунта при распространении поперечной волны через случайные многослойные среды показал, что реальные грунты значительно отличаются от теоретического однородного грунта [13]. Учет стохастической неоднородности однослойного основания приводит к увеличению его демпфирующих свойств и смещению спектра собственных частот в область более низких значений, в то время как для многослойных грунтов со случайными толщинами слоев наблюдается усиление реакции на свободной поверхности и сдвиг резонансных частот в сторону высоких значений. Это явление особенно выражено для мягких слоев [13, 14].

Впервые концепция применения модели слоистой среды для анализа системы «сооружение – основание» была предложена в работах А.П. Сеницына, Э.Е. Хачияна и Е.С. Медведевой [15, 16]. Сооружение может рассматриваться как прямоугольный брус с приведенными характеристиками, если размеры его структурных неоднородностей меньше длины сейсмической волны [17]. Это условие соблюдается

для большинства сейсмостойких зданий массового строительства. В работах авторов [18, 19] проведена верификация модели слоистой среды с целью представления сооружения также в виде многослойной системы. Задача решена в вероятностной постановке для произвольного количества слоев.

Цель настоящего исследования заключается в анализе реакций системы «сооружение – многослойное основание» в зависимости от соотношений их жесткостей, а также в сопоставлении результатов, полученных при моделировании многослойного и эквивалентного однородного основания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема системы «сооружение – многослойное основание» с произвольным количеством слоев на основе модели горизонтальной слоистой среды приведена на рис. 1. Система состоит из $n + 2$ слоев с различными параметрами плотности ρ_j , модуля сдвига G_j , скорости распространения поперечных волн V_{sj} и мощности H_j ($j = 0, 1, \dots, n + 1$). Сооружение (слой 0) рассматривается как сдвигаемый брус с приведенными характеристиками [15], слой $n + 1$ — жесткое подстилающее полупространство.

Сейсмическую нагрузку моделируем в виде сдвиговой волны $\tilde{f}(t)$, вертикально распространяющейся из коренных пород в горизонтально-слои-

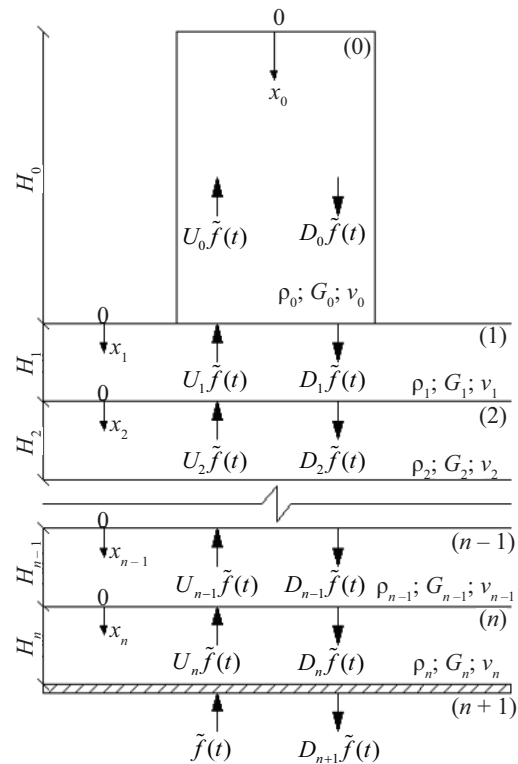


Рис. 1. Расчетная модель системы «сооружение – многослойное основание»

Fig. 1. Calculation model of the “structure – multilayer base” system

234

Из уравнений (9) находим АЧХ отдельно для каждого слоя (10) и АЧХ для системы «сооружение – многослойное основание» в целом (11):

$$h(\omega, x_j) = \frac{F_j(\omega, x_j)}{F_{j+1}(\omega, 0)}; \quad (10)$$

$$x_j = 0, \dots, H_j; j = 0, 1, \dots, n;$$

$$h(\omega, x) = \frac{F(\omega, x)}{F_{n+1}(\omega, 0)}; \quad (11)$$

$$x = 0, \dots, H; H_j = H_0 + H_1 + \dots + H_n,$$

где $F(\omega, x)$ — амплитуда колебаний всего пакета слоев; $F_{n+1}(\omega, 0)$ — амплитуда волны, входящей из коренных пород в поверхностные слои основания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование взаимодействия сооружения с многослойным основанием в зависимости от жесткостей сооружения и составляющих слоев грунта. Для анализа используем следующие параметры отклика системы: АЧХ $h(i\omega_k)$, спектральную плотность $S_F(\omega)$ и коэффициент динамичности $\beta(x)$.

Выбраны три здания с несущими стенами из монолитного железобетона (класс бетона — В20; класс арматуры — А400) различной геометрии (рис. 2).

Здание 1: размеры в плане 42×30 м; начальная высота здания 66 м; количество этажей 20.

Здание 2: размеры в плане $32,4 \times 12$ м; начальная высота здания 30,36 м; количество этажей 12.

Здание 3: размеры в плане $18,45 \times 15$ м; начальная высота здания 44,8 м; количество этажей 16.

Проведем серию расчетов, постепенно понижая этажность, соответственно увеличивая жесткость здания. Геометрические размеры зданий и их эффективные расчетные параметры ρ_0 , G_0 и V_{s0} приведены в табл. 1.

Рассматривалось двухслойное основание, сложенное грунтами, существенно различающимися по сейсмическим жесткостям. Расчет системы проводился для трех вариантов основания (рис. 3).

Вариант 1: здание — приповерхностный слабый грунт – жесткий грунт.

Вариант 2: здание — жесткий грунт – слабый грунт.

Вариант 3: здание — однородный грунт с эквивалентными приведенными характеристиками.

Расчетные характеристики грунтов приняты в соответствии с СП 358.1325800.2017, категории грунтов по сейсмическим свойствам — в соответствии с СП 14.13330.2018 (табл. 2).

Предварительно была выполнена оценка необходимости учета сейсмического взаимодействия для выбранных зданий и типов грунтового основания.

Для оценки значимости обратного воздействия сооружения на колебания основания в работе [21] А.М. Уздин использует две зависимости — $\tilde{m}(a_0, \chi)$ и $m_*(a_0)$. Параметры взаимодействия:

$$a_0 = \frac{\omega r}{v_2} \text{ — безразмерная резонансная частота;}$$

$$m_0 = \frac{m}{\rho \cdot r^3} \text{ — относительная масса сооружения;}$$

$$\chi = \frac{K_x h^2}{K_\phi} \text{ — соотношение между сдвиговой и по-$$

воротной жесткостью фундамента.

В приведенных формулах используются следующие обозначения: ω — частота основного тона колебаний сооружения на жестком основании; r — приведенный радиус фундамента; v_2 — скорость распространения сдвиговых волн в основании; ρ — плотность грунта основания; K_ϕ и K_x — соответственно поворотная и сдвиговая жесткости фундамента, определяемые согласно работе [22]; h — расстояние от уровня подошвы фундамента до его центра тяжести.

На рис. 4 приведена картина степени взаимодействия сооружения с основанием [21] в зависимости от соотношения их жесткостей.

Плоскость $m_0 - 0 - a_0$ разделена кривыми $\tilde{m}(a_0, \chi)$, $m_*(a_0)$ и линиями $a_{0,\min} = 0,28$, $a_{0,\max} = 0,95$ на 6 зон влияния. В зонах 1, 2 процессы взаимодействия сооружения с основанием незначительны. Зона 3 характеризуется существенным влиянием основания. В зонах 4 и 5 влияние обратного воздействия сооружения на грунт необходимо учитывать при $\chi < \chi_*(a_0)$, а в зоне 6 — при $a_0 > a_{0,\max}$.

Для всех вариантов зданий и грунтовых оснований параметры m_0 и a_0 соответствуют 3, 4 и 5 зонам.

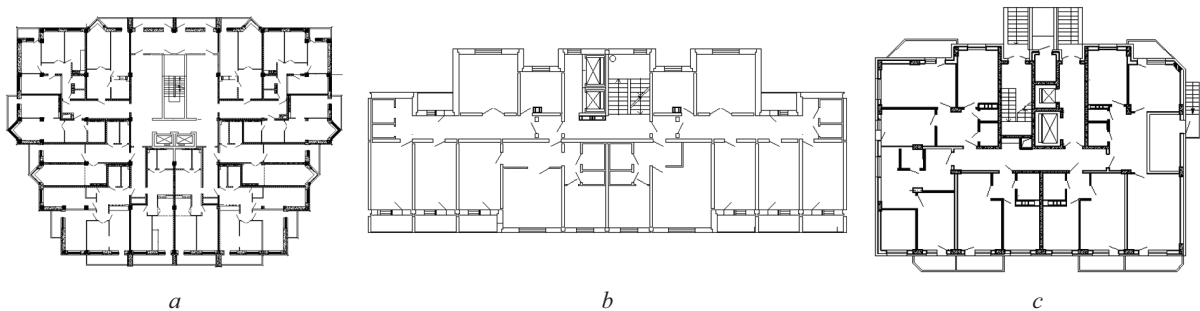


Рис. 2. Планы зданий: а — здание 1; б — здание 2; с — здание 3

Fig. 2. Building plans: a — building 1; b — building 2; c — building 3

Табл. 1. Расчетные характеристики зданий
Table 1. Design characteristics of buildings

Номер Number	Количество этажей Number of floors	Эффективная плотность ρ_0 , г/см ³ Effective density ρ_0 , g/cm ³	Скорость распространения поперечной волны V_{s0} , м/с The velocity of the transverse wave propagation V_{s0} , m/s	Сдвиговая жесткость G_0 , Н/м ² Shear stiffness G_0 , N/m ²	Высота H , м Height H , m
1	5	0,038	767,5	22 383,2	15
	7		729,1	20 201,1	21
	9		693,4	18 270,6	27
	12		647,8	15 945,1	36
	16		598,3	13 603,4	48
	20		581,4	12 168,4	66
2	3	0,06	843	42 641,1	7,59
	5		828,8	41 212,2	12,65
	7		808,8	39 248,9	17,71
	9		788,3	37 280,1	22,77
	12		756,1	34 301,7	30,36
	16		729,1	32 201,1	48
3	3	0,029	377,9	4142,5	8,4
	5		326,3	3087,3	14
	7		288,8	2418	19,6
	9		261,9	1989,9	25,2
	12		232,8	1572,3	33,6
	16		206,6	1237,7	44,8

Это означает, что взаимодействие здания с основанием должно учитываться. Количественную оценку степени взаимодействия получаем, используя рассматриваемую в работе модель горизонтальной слоистой среды.

Принимая стационарную модель сейсмической нагрузки $\tilde{f}(t)$, используем спектральную плотность вида:

$$S_f(\omega) = D_f \frac{2\alpha}{\pi} \left(\frac{m^2 + \omega^2}{m^2 + 2a\omega^2 + \omega^4} \right),$$

где D_f — дисперсия сейсмического ускорения; $m^2 = a_2 + \beta^2$; $a^2 = a^2 - \beta^2$.

Усредненные коэффициенты спектральной плотности $D_f = 1 \text{ м/с}^2$; $\alpha = 7 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 16 \text{ с}^{-1}$.

Коэффициент динамичности системы находим как отношение стандартов ускорений выходной и входной случайных функций. Для пакета слоев входная нагрузка из подстилающего слоя коренных пород равна сумме падающей и отраженной волны. Дисперсия этой нагрузки равна дисперсии функции:

$$F_{n+1}(\omega, 0) = 1 + D_{n+1}(\omega); D_{F_{n+1}} \approx 2;$$
$$\beta(x) = \sqrt{\frac{D_F(x)}{D_{F_{n+1}}}} \approx \sqrt{\frac{D_F(x)}{2}}.$$

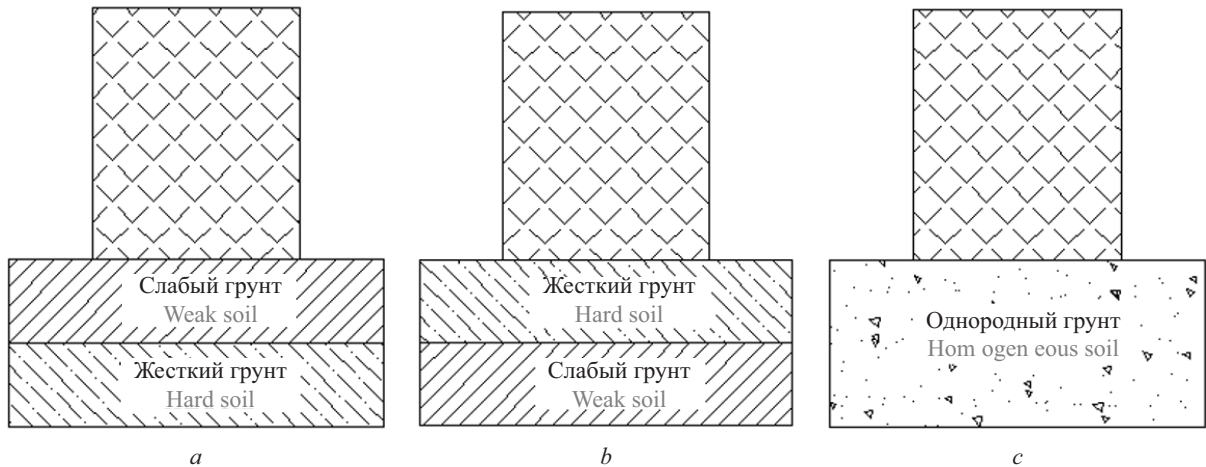


Рис. 3. Варианты расчета системы «сооружение – основание»: а — вариант 1; б — вариант 2; с — вариант 3
Fig. 3. Calculation options for the “structure – base” system: a — option 1; b — option 2; c — option 3

Табл. 2. Расчетные характеристики слоев грунта
Table 2. Calculated characteristics of soil layers

Тип грунта Type of soil	Категория грунта Soil category	Наименование слоя Name of the layer	Плотность ρ_p , г/см ³ Density ρ_p , g/cm ³	Скорость распространения поперечной волны V_{sp} , м/с The velocity of the transverse wave propagation V_{sp} , m/s	Мощность H_p , м Thickness H_p , m
Жесткий грунт Hard ground	II	Лессовый грунт водонасыщен- ный Loess soil water saturated	2,0	700	20
Слабый грунт Weak ground	III	Суглинки аэрированные Aerated loams	1,75	210	20
Однородный грунт Homogeneous soil	III*	—	1,875	455	40

Примечание: * — определено ориентировочно исходя из средневзвешенных физических характеристик однородного грунтового слоя.
Note: * — determined tentatively based on weighted average physical characteristics of homogeneous soil layer.

На рис. 5 приведены графики изменения коэффициентов динамичности в зависимости от этажности (жесткости) здания для трех вариантов моделирования грунтового основания. Как видно из графиков, в большинстве случаев замена двухслойного грунта однородным с приведенными характеристиками приводит к занижению коэффициента динамичности системы.

Также на графиках видно, что если под фундаментом здания находится жесткий грунт, то колебания здания оказывают несущественное влияние на величину коэффициента динамичности всей системы. Исключение составляют здания с низкой скоростью прохождения волны (здание 3), т.е. с низкой сейсмической жесткостью. В случае, когда под фундаментом здания находятся слабые грунты, учет совместной работы здания с основанием обязателен,

поскольку колебания здания вносят значительный вклад в общие колебания системы и, соответственно, в величину коэффициента динамичности. Аналогичные выводы были получены в работе [23].

Коэффициент динамичности представляет собой интегральную характеристику реакции системы и зависит от распределения ее резонансных частот в диапазоне несущих частот сейсмического воздействия. Для более глубокого изучения особенностей колебательных процессов в системе «сооружение – многослойное основание» целесообразно проанализировать распределение ее резонансных частот.

В рамках исследования проведен анализ влияния жесткости здания на распределение резонансных частот в системе «сооружение – многослойное основание». Рассматривались АЧХ системы для различных этажностей (жесткостей) здания применительно к трем ранее описанным вариантам основания, а также АЧХ здания как компонента многослойной системы. На графиках в табл. 3 АЧХ всей системы «здание – основание» обозначены синим цветом, АЧХ здания — красным цветом. Зеленым цветом выделен график спектральной плотности сейсмического ускорения грунта, который позволяет оценить диапазон частот, соответствующий максимальным амплитудам спектра.

Как видно из графиков, представленных в табл. 3, с увеличением жесткости здания уменьшается его влияние на динамические характеристики всей системы.

В табл. 4 представлены основные результаты расчетов сейсмического отклика здания № 1 с различной жесткостью (этажностью) для трех вариантов грунтовых условий.

С увеличением жесткости здания наблюдается рост коэффициента динамичности на уровне контакта с основанием как для жесткого, так и для податливого

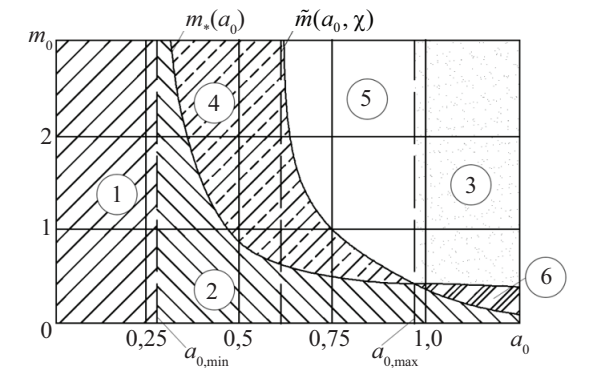


Рис. 4. Зоны различного влияния здания на основание в соответствии с трудом [21]
Fig. 4. Zones of different influence of the building on the foundation in accordance with [21]

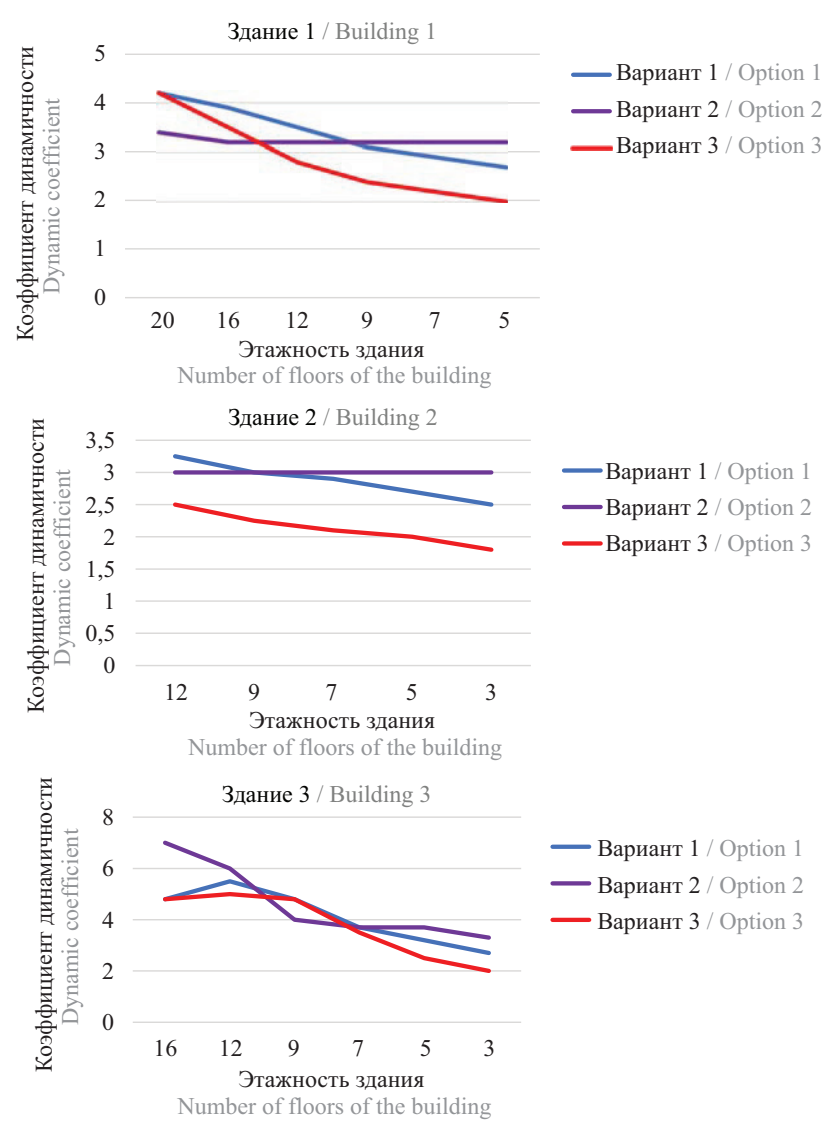
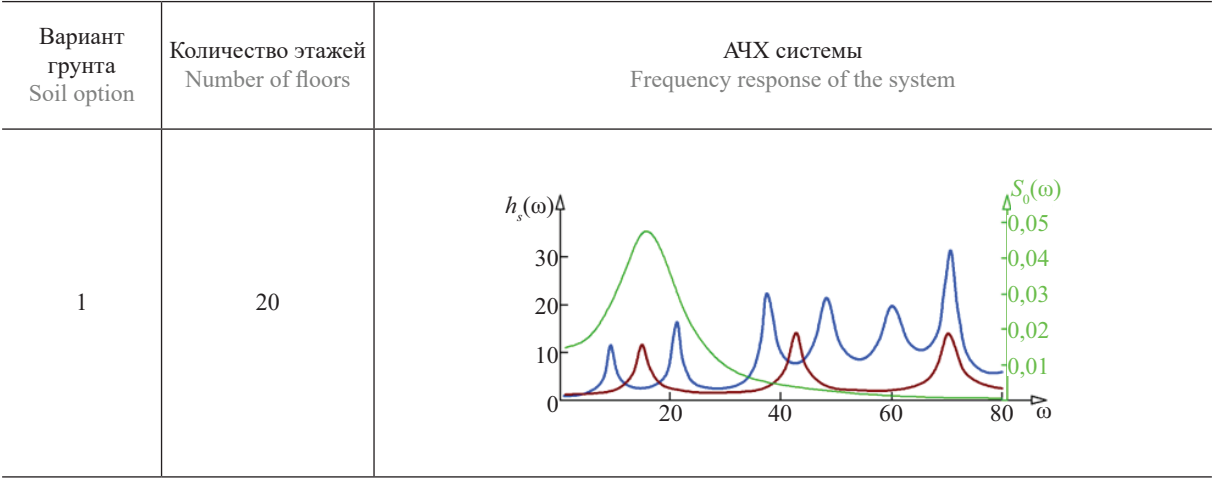


Рис. 5. Коэффициенты динамичности системы «сооружение – многослойное основание» при различной этажности здания

Fig. 5. Dynamic coefficients of the “structure – multilayer foundation” system with different storeys of the building

Табл. 3. Распределение резонансных частот системы «здание – основание» для здания № 1 с различным числом этажей
Table 3. Distribution of resonant frequencies of the “building – base” system for building No. 1 with a different number of floors



Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

Вариант грунта Soil option	Количество этажей Number of floors	АЧХ системы Frequency response of the system
2	20	
3		
1	12	
2		
3		
1	5	

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

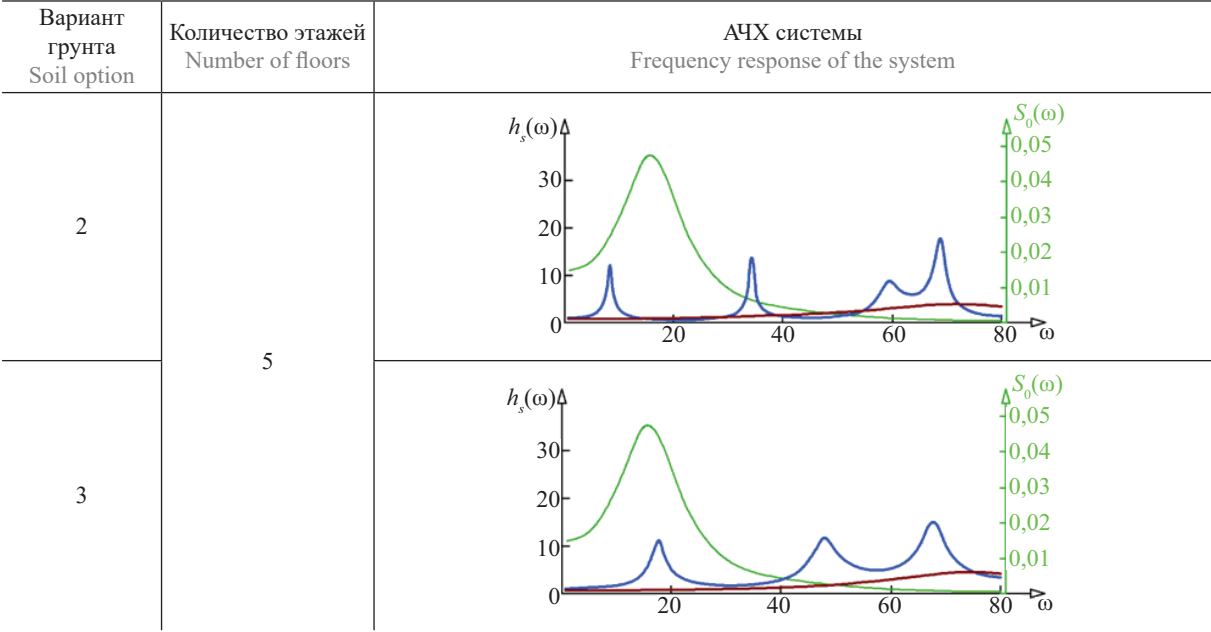


Табл. 4. Коэффициенты динамичности и распределение резонансных частот по слоям системы «здание – основание»
Table 4. Dynamic coefficients and distribution of resonant frequencies across the layers of the building – base system

Вариант моделирования основания A variant of modelling the base	Этажность Number of floors	20	12	5
	H ₀ , м m	66	36	15
	G ₀ , Н/м ² N/m ²	12 168,4	15 945,1	22 383,2
Коэффициенты динамичности Dynamic coefficients				
1 слабый грунт – жесткий грунт weak soil – hard soil	β(H ₀)	2,2	2,50	2,4
	β(0)	4,2	3,5	2,7
	β _{отн} / β _{res}	2,0	1,0	0,3
2 жесткий грунт – слабый грунт hard soil – weak soil	β(H ₀)	2,2	2,8	3,1
	β(0)	3,4	3,2	3,2
	β _{отн} / β _{res}	1,2	0,4	0,1
3 однородный грунт homogeneous soil	β(H ₀)	1,6	1,8	1,8
	β(0)	4,2	2,8	2
	β _{отн} / β _{res}	1,6	1,0	0,2
Резонансные частоты, с ⁻¹ Resonant frequencies, s ⁻¹				
1	Собственные частоты здания (слой 0) Building natural frequencies (layer 0)	ω ₁ = 13,0 ω ₂ = 42,4 ω ₃ = 70,0	ω ₁ = 30,2 ω ₂ = 84,8	ω ₁ = 85,1
	Слой 1 Layer 1	ω ₁ = 9,4 ω ₂ = 22,3 ω ₃ = 39,0 ω ₄ = 52,7 ω ₅ = 68,4	ω ₁ = 12,6 ω ₂ = 32,3 ω ₃ = 52,4 ω ₄ = 74,4	ω ₁ = 15,4 ω ₂ = 43,0 ω ₃ = 69,7
	Слой 2 Layer 2	ω ₁ = 37,3 ω ₂ = 46,8 ω ₃ = 61,1 ω ₄ = 71,3	ω ₁ = 11,3 ω ₂ = 29,7 ω ₃ = 47,2	ω ₁ = 38,4 ω ₂ = 57,8 ω ₃ = 74,6

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Резонансные частоты, с ⁻¹ Resonant frequencies, s ⁻¹				
1	На уровне контакта со зданием At the level of contact with the building	$\omega_1 = 9,0$ $\omega_2 = 21,5$ $\omega_3 = 37,7$ $\omega_4 = 49,4$ $\omega_5 = 60,7$	$\omega_1 = 11,8$ $\omega_2 = 48,0$ $\omega_3 = 62,4$ $\omega_4 = 77,2$	$\omega_1 = 14,6$ $\omega_2 = 39,6$ $\omega_3 = 58,1$ $\omega_4 = 74,7$
	На уровне верха здания At the top level of the building	$\omega_1 = 9,5$ $\omega_2 = 29,5$ $\omega_3 = 37,7$ $\omega_4 = 49,4$ $\omega_5 = 61,1$	$\omega_1 = 12,2$ $\omega_2 = 30,2$ $\omega_3 = 47,8$ $\omega_4 = 62,4$ $\omega_5 = 77,2$	$\omega_1 = 14,8$ $\omega_2 = 39,7$ $\omega_3 = 58,2$ $\omega_4 = 74,7$
2	Собственные частоты здания (слой 0) Building natural frequencies (layer 0)	$\omega_1 = 14,8$ $\omega_2 = 42,6$ $\omega_3 = 70,0$	$\omega_1 = 30,6$ $\omega_2 = 86,3$	$\omega_1 = 84,8$
	Слой 1 Layer 1	$\omega_1 = 39,6$ $\omega_2 = 58,5$ $\omega_3 = 74,0$	$\omega_1 = 26,3$ $\omega_2 = 59,2$	$\omega_1 = 50,4$
	Слой 2 Layer 2	$\omega_1 = 7,2$ $\omega_2 = 17,5$ $\omega_3 = 34,7$ $\omega_4 = 43,2$ $\omega_5 = 64,7$	$\omega_1 = 8,1$ $\omega_2 = 36,7$ $\omega_3 = 65,5$	$\omega_1 = 8,7$ $\omega_2 = 34,7$ $\omega_3 = 64,3$
	На уровне контакта со зданием At the level of contact with the building	$\omega_1 = 7,2$ $\omega_2 = 17,5$ $\omega_3 = 34,7$ $\omega_4 = 64,7$	$\omega_1 = 8,1$ $\omega_2 = 36,7$ $\omega_3 = 65,5$	$\omega_1 = 8,7$ $\omega_2 = 34,7$ $\omega_3 = 64,3$
	На уровне верха здания At the top level of the building	$\omega_1 = 7,2$ $\omega_2 = 17,5$ $\omega_3 = 34,7$ $\omega_4 = 43,2$ $\omega_5 = 64,7$ $\omega_6 = 70,1$	$\omega_1 = 7,9$ $\omega_2 = 30,6$ $\omega_3 = 36,7$ $\omega_4 = 65,5$	$\omega_1 = 8,7$ $\omega_2 = 34,6$ $\omega_3 = 64,1$
3	Собственные частоты здания (слой 0) Building natural frequencies (layer 0)	$\omega_1 = 14,8$ $\omega_2 = 42,5$ $\omega_3 = 70,1$	$\omega_1 = 30,4$	$\omega_1 = 84,7$
	Слой 1 Layer 1	$\omega_1 = 11,6$ $\omega_2 = 22,3$ $\omega_3 = 41,0$ $\omega_4 = 55,2$	$\omega_1 = 16,1$ $\omega_2 = 32,5$ $\omega_3 = 55,5$	$\omega_1 = 18,3$ $\omega_2 = 50,4$ $\omega_3 = 76,5$
	На уровне контакта со зданием At the level of contact with the building	$\omega_1 = 11,6$ $\omega_2 = 22,3$ $\omega_3 = 41,0$ $\omega_4 = 55,2$	$\omega_1 = 16,1$ $\omega_2 = 32,5$ $\omega_3 = 55,5$	$\omega_1 = 18,3$ $\omega_2 = 50,4$ $\omega_3 = 76,5$
	На уровне верха здания At the top level of the building	$\omega_1 = 11,9$ $\omega_2 = 21,9$ $\omega_3 = 41,0$ $\omega_4 = 55,2$	$\omega_1 = 16,1$ $\omega_2 = 32,5$ $\omega_3 = 55,5$	$\omega_1 = 18,3$ $\omega_2 = 50,4$ $\omega_3 = 76,5$

приповерхностного слоя грунта. На уровне верха здания коэффициент динамичности уменьшается, а также уменьшается смещение верха здания относительно основания $\beta_{\text{отн}}$: для верхнего слабого слоя с 2,0 до 0,3, для верхнего жесткого слоя с 1,2 до 0,1. То есть сооружение начинает перемещаться совместно с основанием практически как единое целое, что приводит к снижению усилий в конструкциях.

Расчеты подтвердили, что спектр собственных частот здания с учетом его взаимодействия с основанием смещается в сторону более низких значений по сравнению со спектром частот здания на абсолютном жестком основании. При этом наблюдается сгущение спектра. Так, в диапазоне $[0, 80]$ с⁻¹ количество собственных частот 20-этажного здания, расположенного на верхнем слое слабого грунта, увеличилось с 3 до 5. Для 5-этажного здания — с 1 до 4. На верхнем жестком слое соответственно с 3 до 6 и с 1 до 3.

Резонансные частоты системы «здание – жесткий слой – слабый слой» определяются преимущественно значениями резонансных частот слабого нижнего слоя, особенно наглядно это проявляется с увеличением жесткости зданий, а также для зданий на однородном приведенном основании (в данном примере с невысокими жесткостными характеристиками). Вместе с тем в спектре резонансных частот системы возможно появление частот, соответствующих собственным частотам здания. Например, частота 70,1 с⁻¹ соответствует собственной частоте 20-этажного здания. То же относится к частоте 30,6 с⁻¹ для 12-этажного здания.

Резонансные частоты системы «здание – слабый слой – жесткий слой» включают частоты колебаний как первого, так и второго слоев основания, а также частоты самого здания.

Результаты расчета для здания второго и третьего вариантов также подтвердили данные выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения влияния соотношения жесткостей здания и многослойного основания на динамический отклик системы при сейсмическом воздействии применяется волновая модель горизонтальной слоистой среды.

Предварительная оценка значимости обратного воздействия сооружения на колебания основания показала, что для всех вариантов зданий и грунтовых оснований, принятых для исследования, должен учитываться эффект их взаимодействия при сейсмических колебаниях.

Упрощенное представление грунта как однородного без учета его слоистой структуры снижает величину коэффициента динамичности до 30 %.

Спектр собственных частот здания при учете его взаимодействия с основанием сгущается и одновременно смещается в сторону более низких значений. Резонансные частоты системы «здание – жесткий слой – слабый слой» преимущественно определяются резонансными частотами слабого нижнего слоя, особенно при увеличении жесткости зданий. Аналогичная картина характерна и для однородного основания. В системе «здание – слабый слой – жесткий слой» резонансные частоты зависят от частот составляющих слоев основания, а также от собственных частот здания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбрайер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 255 с.
2. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. М. : ACB, 2014. 135 с.
3. Harichane Z., Guellil M.E., Gadouri H. Benefits of probabilistic soil-foundation-structure interaction analysis // International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering. 2018. Vol. 9. Issue 1. Pp. 42–64. DOI: 10.4018/ijgee.2018010103
4. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Soudouk A. Soil and structure uncertainty effects on the soil foundation structure dynamic response // Earthquakes and Structures. 2017. Vol. 12. Issue 2. Pp. 153–163. DOI: 10.12989/eas.2017.12.2.153
5. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi A. Comparison between non-linear and stochastic methods for dynamic SSI problems // Advances in Science, Technology & Innovation. 2019. Pp. 191–194. DOI: 10.1007/978-3-030-01656-2_43
6. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi E. Seismic codes based equivalent nonlinear and stochastic soil structure interaction analysis // Studia Geotechnica et Mechanica. 2020. Vol. 43. Issue 1. Pp. 1–14. DOI: 10.2478/sgem-2020-0007
7. Brandis A., Kraus I., Petrovic S. Nonlinear static seismic analysis and its application to shallow founded buildings with soil-structure interaction // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 11. P. 2014. DOI: 10.3390/buildings12112014
8. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction : a state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures // Frontiers in Built Environment. 2023. Vol. 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351
9. Mylonakis G., Gazetas G. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental // Journal of Earthquake Engineering. 2000. Vol. 4. Issue 3. Pp. 277–301. DOI: 10.1080/13632460009350372
10. Brahma A., Beneldjouzi M., Hadid M., Remki M. Evaluation of the Seismic Response of Reinforced Concrete (RC) Buildings Considering Soil-Structure-Interaction Effects // The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. 2023. Vol. 26. Pp. 49–59. DOI: 10.55549/epstem.1409304
11. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon // Structures. 2022. Vol. 38. Pp. 599–617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024

12. Алешин А.С. О достоинствах и недостатках классификации грунтов NEHRP // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 1. С. 10–31. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-1-10-31. EDN DQFZIIY.

13. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of soil heterogeneities on its seismic responses // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Pp. 221–232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19

14. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Soudouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra // Indian Geotechnical Journal. 2019. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y

15. Сеницын А.П., Медведева Е.С., Хачиян Э.Е. и др. Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. М.: Наука, 1987. 159 с.

16. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван: Гитутюн НАН РА, 2015. 555 с.

17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Issue 17. DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z

18. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю. Вероятностный анализ динамических характеристик системы «сооружение – слоистое основание» // Изве-

стия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 32–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI.

19. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю., Жиденко А.С., Чанчан М., Хамиси С. Сравнительный анализ результатов расчета системы «здание – основание», представленной в виде слоистой модели // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 43–53. EDN ELCFWD.

20. Артоболевский И.И., Боголюбов А.Н., Болотин В.В. и др. Колебания линейных систем // Вибрации в технике: справочник. 1978. 352 с.

21. Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. 175 с.

22. Саргсян А.Е., Гукова Е.Г., Шапошников Н.Н. Динамическая механическая модель основания сооружения с учетом инерционных свойств грунтов // Вестник МГСУ. 2012. № 2. С. 66–69. EDN PDBTYH.

23. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction // Structures. 2023. Vol. 52. Pp. 348–369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186

Поступила в редакцию 22 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 5 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валерия Александровна Пшеничкина** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; vap_hm@list.ru;

Станислав Юрьевич Иванов — ассистент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 1078261, ORCID: 0000-0003-4770-8754; stassuz-1-14@yandex.ru;

Сергей Сергеевич Рекунов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 496757, Scopus: 57190969032, ResearcherID: ABB-4080-2020, ORCID: 0000-0002-9360-8239; rekunoff@mail.ru;

Алексей Александрович Чураков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28, РИНЦ ID: 475651, Scopus: 57214092414, ORCID: 0000-0002-0810-8177; alexei.churakov@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Birbrayer A.N. *Seismic stability analysis of structures*. St. Petersburg, Nauka, 1998; 255. (rus.).

2. Tyapin A.G. *Accounting for the interaction of structures with the foundation in seismic impact calculations*. Moscow, ASV, 2014; 135. (rus.).

3. Harichane Z., Guellil M.E., Gadouri H. Benefits of probabilistic soil–foundation–structure interaction analysis. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*. 2018; 9(1):42–64. DOI: 10.4018/ijgee.2018010103

4. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Sadouk A. Soil and structure uncertainty effects on the soil foundation structure dynamic response. *Earthquakes and Structures*. 2017; 12(2):153-163. DOI: 10.12989/eas.2017.12.2.153
5. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi A. Comparison Between Non-linear and Stochastic Methods for Dynamic SSI Problems. *Advances in Science, Technology & Innovation*. 2019; 191-194. DOI: 10.1007/978-3-030-01656-2_43
6. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi E. Seismic codes based equivalent nonlinear and stochastic soil structure interaction analysis. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2020; 43(1):1-14. DOI: 10.2478/sgem-2020-0007
7. Brandis A., Kraus I., Petrovic S. Nonlinear Static Seismic Analysis and Its Application to Shallow Founded Buildings with Soil-Structure Interaction. *Buildings*. 2022; 12(11):2014. DOI: 10.3390/buildings12112014
8. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction : a state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351
9. Mylonakis G., Gazetas G. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental. *Journal of Earthquake Engineering*. 2000; 4(3):277-301. DOI: 10.1080/13632460009350372
10. Brahma A., Beneldjouzi M., Hadid M., Remki M. Evaluation of the Seismic Response of Reinforced Concrete (RC) Buildings Considering Soil-Structure-Interaction Effects. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*. 2023; 26:49-59. DOI: 10.55549/epstem.1409304
11. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon. *Structures*. 2022; 38:599-617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024
12. Aleshin A.S. The advantages and disadvantages of the NEHRP soil classification. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2021; 1:10-31. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-1-10-31. EDN DQFZIY. (rus.).
13. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of Soil Heterogeneities on Its Seismic Responses. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 221-232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19
14. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra. *Indian Geotechnical Journal*. 2019; 49(2):151-160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y
15. Sinitsyn A.P., Medvedeva E.S., Khachiyan E.E. et al. *Wave processes in building structures under seismic impacts*. Moscow, Nauka, 1987; 159. (rus.).
16. Khachiyan E.E. *Seismic impacts and prediction of structure behavior*. Yerevan, Gitutyun NAS RA, 2015; 555. (rus.).
17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020; 13(17). DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z
18. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu. Probabilistic analysis of dynamic characteristics of the “structure – layered foundation” system. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2024; 8(788):32-43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI. (rus.).
19. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu., Zhidenko A.S., Tchanchane M., Hamici S. Comparative analysis of the calculation results of the building-base system presented in the form of a layered model. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: construction and architecture*. 2023; 1(90):43-53. EDN ELCFWD. (rus.).
20. Artobolevsky I.I., Bogolyubov A.N., Bolotin V.V. et al. Oscillations of linear systems. *Vibrations in technology : handbook*. 1978; 352. (rus.).
21. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Al-Nasser-Mohomad Samih Amin. *Fundamentals of the theory of seismic resistance and seismic-resistant construction of buildings and structures*. St. Petersburg, 1993; 175. (rus.).
22. Sargsjan A.E., Gukova E.G., Shaposhnikov N.N. Dynamic Mechanical Model of Bases of Structures That Takes Account of Inertial Properties of Soils. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 2:66-69. EDN PDBTYH. (rus.).
23. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction. *Structures*. 2023; 52:348-369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186

Received October 22, 2024.

Adopted in revised form on October 27, 2024.

Approved for publication on November 5, 2024.

B I O N O T E S : **Valeria A. Pshenichkina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures, Foundations and reliability of structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; vap_hm@list.ru;

Stanislav Yu. Ivanov — Assistant of the Department of Building Structures, Foundations and reliability of structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 1078261, ORCID: 0000-0003-4770-8754; stassuz-1-14@yandex.ru;

Sergey S. Rekunov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 496757, Scopus: 57190969032, ResearcherID: ABB-4080-2020, ORCID: 0000-0002-9360-8239; rekunoff@mail.ru;

Alexey A. Churakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; SPIN-code: 6565-3690, ID RSCI: Scopus: 57214092414, ORCID: 0000-0002-0810-8177; alexei.churakov@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Численное моделирование динамического отклика башни «Эволюция» при ветровом воздействии с учетом застройки и разрешением турбулентности

Сергей Гургенович Саиян¹, Артемий Викторович Васильев²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие нормативные методики не всегда адекватно описывают динамический отклик высотных зданий при ветровых воздействиях, особенно с учетом сложной геометрии и взаимодействия с окружающей застройкой. В данном исследовании разработана методика численного моделирования динамического отклика высотных зданий при ветровых воздействиях, учитывающая аэродинамическую интерференцию и разрешающая спектр турбулентных пульсаций на основе нестационарного CFD-моделирования и прямого динамического конечно-элементного анализа. Показан пример использования данной методики и численные результаты моделирования динамического отклика при разных углах атаки ветра башни «Эволюция», входящей в состав ММДЦ «Москва-Сити».

Материалы и методы. Методика разделяет задачу на два этапа: нестационарное аэродинамическое моделирование и расчет динамической реакции конструкции. Для этого разработаны аэродинамические модели комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити» и конечно-элементная модель башни «Эволюция». Для аэродинамического моделирования применена гибридная модель турбулентности SBES, позволяющая разрешать спектр турбулентных пульсаций. Динамический отклик здания вычисляется с использованием прямого динамического конечно-элементного анализа на основе неявного метода Ньюмарка.

Результаты. Результаты аэродинамического моделирования представлены в виде поэтажных распределений аэродинамических сил и моментов для разных направлений ветра. Вычисленный на их основе динамический отклик показал существенное влияние аэродинамической интерференции на поведение здания. Сравнение с расчетами по нормативной методике СП 20.13330.2016 продемонстрировало консервативность последних и необходимость более точных методов расчета.

Выводы. Предложенная методика позволяет более точно прогнозировать динамический отклик высотных зданий при ветровых воздействиях, что имеет важное значение для обеспечения механической безопасности и динамической комфортности. Рекомендуется внедрение данной методики в практику расчетных обоснований высотных зданий, что даст возможность оптимизировать конструктивные решения, повысить механическую безопасность и увеличить экономическую эффективность высотного строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высотные здания, ветровые воздействия, аэродинамика зданий и сооружений, CFD-моделирование, динамический отклик, турбулентные пульсации, башня «Эволюция», ММДЦ «Москва-Сити», численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саиян С.Г., Васильев А.В. Численное моделирование динамического отклика башни «Эволюция» при ветровом воздействии с учетом застройки и разрешением турбулентности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 246–279. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279

Автор, ответственный за переписку: Сергей Гургенович Саиян, berformert@gmail.com.

Numerical Simulation of the Dynamic Response of the “Evolution” Tower under Wind Action Considering Surrounding Buildings and Turbulence Resolution

Sergey G. Saiyan¹, Artemiy V. Vasiliev²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² National University of Oil and Gas “Gubkin University”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Existing normative methodologies do not always adequately describe the dynamic response of high-rise buildings under wind action, especially when considering complex geometry and interaction with surrounding developments.

In this study, a numerical simulation methodology for the dynamic response of high-rise buildings under wind action is developed, accounting for aerodynamic interference and resolving the spectrum of turbulent fluctuations based on unsteady CFD-modelling and direct dynamic finite element analysis. An example of using this methodology is shown, along with numerical results of modelling the dynamic response at different wind attack angles of the “Evolution” Tower, which is part of the Moscow International Business Centre “Moscow-City”.

Materials and methods. The methodology divides the problem into two stages: unsteady aerodynamic modelling and calculation of the dynamic response of the structure. Aerodynamic models of the building complex of the Moscow International Business Centre “Moscow-City” and a finite element model of the “Evolution” Tower were developed for this purpose. A hybrid turbulence model SBES was applied for aerodynamic simulation, allowing the resolving of the spectrum of turbulent fluctuations. The dynamic response of the building is calculated using direct dynamic finite element analysis based on the implicit Newmark method.

Results. The results of aerodynamic simulation are presented as floor-by-floor distributions of aerodynamic forces and moments for different wind directions. The calculated dynamic response based on these results showed a significant influence of aerodynamic interference on the building’s behaviour. Comparison with calculations using the normative methodology CP 20.13330.2016 demonstrated the conservatism of the latter and the need for more accurate calculation methods.

Conclusions. The proposed methodology allows for a more accurate prediction of the dynamic response of high-rise buildings under wind action, which is crucial for ensuring mechanical safety and dynamic comfort. It is recommended to implement this methodology in the practice of design justification for high-rise buildings, which will optimize structural solutions, enhance mechanical safety, and increase the economic efficiency of high-rise construction.

KEYWORDS: high-rise buildings, wind action, building aerodynamics, CFD-modelling, dynamic response, turbulent fluctuations, “Evolution” Tower, Moscow International Business Centre “Moscow-City”, numerical simulation

FOR CITATION: Saiyan S.G., Vasiliev A.V. Numerical Simulation of the Dynamic Response of the “Evolution” Tower under Wind Action Considering Surrounding Buildings and Turbulence Resolution. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):246-279. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279 (rus.).

Corresponding author: Sergey G. Saiyan, berformert@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия количество высотных зданий в мире значительно увеличилось. Причины этого заключаются как в демографическом росте в крупных городах, так и стремлении к экономии пространства за счет вертикальной застройки. Эти строения, формирующие городской ландшафт, предъявляют новые требования к расчетам для обеспечения механической безопасности. В соответствии с данными Council of Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH)¹, количество высотных зданий неуклонно растет.

Ветровые воздействия служат одними из ключевых факторов, влияющих на проектирование и эксплуатацию высотных зданий [1–3]. С увеличением высоты здания возрастает ветровая нагрузка, что связано с особенностями распределения скоростей воздушных потоков на различных уровнях над землей. Ветер представляет собой сложный природный феномен, включающий в себя как средние, так и пульсационные компоненты, оказывающие динамическое воздействие на конструкции. Ветровые потоки вблизи поверхности земли обычно испытывают трение и препятствия, вызываемые различными объектами городской застройки, деревьями и рельефом. По мере того как воздушные потоки поднимаются выше, сопротивление этих объектов уменьшается, и скорость ветра возрастает. Это явление известно как профиль скорости ветра, при котором ветер становится сильнее на больших высотах. Для малоэтажных зданий влияние ветра обычно не критично, так как ветровые силы, действующие на них, относительно малы.

¹ CTBUH Year in Review: Tall Trends of 2019. The Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). 2020.

Однако с ростом высоты здания ветровая нагрузка возрастает нелинейно. Ветер может вызывать существенные колебания и горизонтальные усилия на высотные здания, что создает необходимость учета этого фактора в проектировании [4–8].

Одной из ключевых особенностей ветрового воздействия на высотные здания является его динамическая природа. В отличие от статической нагрузки, такой как собственный вес конструкции или полезная нагрузка, ветер оказывает переменное давление на здание, что может вызывать динамическую реакцию. Для высотных зданий особенно опасны пульсационные компоненты ветрового воздействия, которые могут совпадать с собственными частотами здания и вызывать резонансные явления. При резонансе колебания конструкции усиливаются и могут достигать значительных величин, что потенциально может привести к повреждениям конструктивных элементов или вызвать дискомфорт для людей, находящихся внутри здания. Это особенно актуально для гибких конструкций высотных зданий, у которых собственные частоты колебаний могут совпадать с колебаниями воздушных потоков (частотой срыва вихрей).

Кроме того, геометрия здания и его архитектурные элементы также играют важную роль в его устойчивости к ветровым нагрузкам. Высотные здания с прямыми вертикальными стенами (прямоугольного сечения) по-разному взаимодействуют с воздушными потоками по сравнению со зданиями, имеющими сложную архитектурную форму. В случае таких высотных зданий, как башня «Эволюция», с ее характерной скручивающейся формой, ветер может создавать турбулентные завихрения и неравномерное распределение давления по поверхности здания.

Это усложняет расчет ветровых нагрузок и требует использования продвинутых методов численного моделирования или экспериментальных (натурных) исследований для точного предсказания динамического отклика.

Для высотных зданий также важно учитывать эффекты аэродинамической интерференции. В условиях плотной городской застройки здания влияют на воздушные потоки друг друга. Здания могут экранировать одно другое от ветра или, наоборот, усиливать ветровые нагрузки за счет концентрации воздушных потоков между сооружениями. Этот эффект, называемый аэродинамической интерференцией, может привести к усилению ветровых нагрузок на отдельные здания или их части, что делает проектирование в городской среде еще более сложной задачей. Так, в работе [9] исследована аэродинамическая интерференция комплекса Московского международного делового центра (ММДЦ) «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий. На основе 256 расчетных случаев были определены средние и пульсационные суммарные аэродинамические силы и моменты в зависимости от хронологии возведения строений для каждого из зданий комплекса.

Все эти факторы ветрового воздействия вносят значительный вклад в напряженно-деформированное состояние (НДС) несущих и фасадных конструкций зданий и сооружений, что требует детального расчетного анализа и учета в процессе проектирования. Динамический вклад в НДС с увеличением высотности зданий и сооружений становится настолько существенным, что по своей интенсивности может превосходить даже сейсмические воздействия. На рис. 1

показаны соотношения относительной спектральной плотности мощности и частот (периодов) колебаний к приближенным интервалам частот собственных колебаний некоторых видов строительных конструкций. Из рис. 1 видно, что хоть сейсмическое воздействие более «мощное», чем ветровое, однако реализуется на более высоких частотах колебаний, что покрывает интервал наиболее энергоемкого спектра при частотах, близких к собственным частотам колебаний для нормальных по высоте зданий.

На рис. 1 ординаты представлены в безразмерной форме; спектр ветра вычислен для $\mu_{v10} = 20$ м/с и $S_{v10}^2 = 2400$ м²/с²; G — коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности грунта и принимаемый обычно в пределах от 0,005 до 0,015; спектр землетрясения соответствует значениям $\mu_a = 0$ и $S_{v10}^2 = 0,38$ м²/с⁴.

Проблема исследования ветровой нагрузки и расчета сооружений на ветровые воздействия распадается на три крупные подзадачи⁴:

- изучение ветрового режима местности, основанное на использовании результатов метеорологических и климатологических исследований;
- оценка сил, вызываемых воздействием ветра на сооружение, которые изучаются на основе решений задач теоретической аэродинамики и данных экспериментальных исследований;
- определение реакции сооружения на ветровую нагрузку, основанное, как правило, на решении задач статики и динамики сооружений.

В рамках настоящего исследования будут рассмотрены вопросы, касающиеся второй и третьей подзадачи.

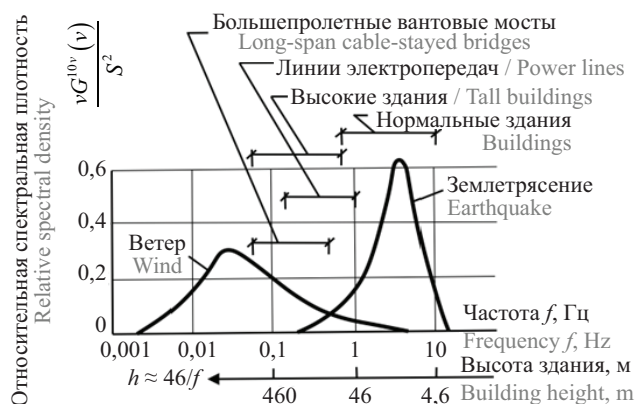


Рис. 1. Сопоставление спектральных плотностей мощности скорости ветра и ускорения грунта с частотами собственных колебаний основных типов сооружений^{2,3}

Fig. 1. Comparison of power spectral densities of wind speed and ground acceleration with natural vibration frequencies of main types of structures^{2,3}

² Ferry-Borges J., Castanheta M. Structural Safety. Lisbon : LNEC, 1971.

³ Аугустини Г., Барамта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании / пер. с англ. Ю.Д. Сухова. М. : Стройиздат, 1988. 584 с.

⁴ Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / под общ. ред. А.В. Перельмутера. 3-е изд., перераб. М. : Изд-во АСВ, 2009. 528 с.

Реакция зданий и сооружений на ветровое воздействие состоит из средней (или осредненной за некоторый временной промежуток) и пульсационной составляющей, которая и представляет динамическое нагружение [10–13]. Пульсационная составляющая вызывается турбулентными вихрями и порывами разного размера и характера, носящими случайный характер. Турбулентные пульсации можно рассматривать как совокупность колебаний ветра на разных частотах. Спектр турбулентных пульсаций описывает распределение энергии этих пульсаций в зависимости от частоты. В турбулентных потоках на низких частотах содержится большая часть энергии ветровых пульсаций, однако и высокочастотные компоненты могут вносить значительный вклад, особенно в случае взаимодействия с резонансными частотами конструкции. Собственная частота колебаний большинства высотных зданий и сооружений больше, чем период срыва вихрей крупных размеров, из-за которых отсутствует динамический отклик (реакция как у жесткого тела). Следовательно, нагрузки, вызываемые «фоновой» турбулентностью или более крупными вихрями, можно рассматривать так же, как и среднюю составляющую ветрового воздействия. Тем не менее более вероятно появление более мелких порывов и вихрей, что дает больше возможностей вызвать динамическую реакцию конструкций вблизи их первых форм собственных частот колебаний⁵. Динамический отклик при этом может действительно приводить к существенным колебаниям. Подход, основанный на факторах порыва ветра, использует это разделение на среднюю и пульсационную составляющую, как это предусмотрено во многих нормативных документах различных стран. Как утверждал A.G. Davenport⁶, такой подход, используемый для установления пульсационной ветровой нагрузки, позволяет выявлять турбулентность в определенном месте, обеспечивает динамический отклик, но также учитывает эффекты уменьшения размерного масштаба турбулентности. Имеется относительно хорошая точность в динамическом отклике вдоль ветрового потока при расчете зданий и сооружений с применением подхода фактора порыва ветра в тех случаях, когда оправдана незначительность влияния окружающей застройки.

С другой стороны, также необходимо учитывать и динамический отклик в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, который, как будет показано далее в статье, вносит вклад неменьший по сравнению с колебаниями вдоль потока. Этот эффект тем выше, чем ниже демпфирование системы. Есть

несколько различных явлений, вызывающих динамический отклик конструкций на ветровое воздействие. К ним относятся бафтинг, вихреобразование, галопирование и флаттер⁷ [13]. Тонкие конструкции, вероятно, будут чувствительны к динамическому отклику в направлении потока как следствие турбулентного бафтинга.

Динамический отклик в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, будет возникать из-за вихреобразования или галопирования, но также может быть результатом возбуждения турбулентным бафтингом. Флаттер — это связанное движение конструкции, часто представляющее собой комбинацию изгибных и крутильных автоколебаний, которые могут привести к аэродинамической неустойчивости. Для строительных конструкций эффекты флаттера и галопирования недопустимы.

Важная проблема, связанная с динамическим откликом высотных зданий при ветровом воздействии, связана с комфортностью верхних этажей^{8,9} [14–18], т.е. реакцией человека на вибрационное воздействие и восприятие колебаний. Здесь достаточно отметить, что самочувствие людей крайне чувствительно к вибрации до такой степени, что колебание верхних этажей высотного здания может вызывать дискомфорт, даже если оно соответствует относительно низкому уровню НДС, далекому от предельного состояния первой группы. Следовательно, для большинства высотных зданий соображения эксплуатационной пригодности в большей степени определяют конструкцию, а не вопросы прочности.

При определении динамических реакций на порывы ветра обычно используются следующие предположения, введенные Аланом Давенпортом⁶:

- конструкция — упругая;
- справедлива гипотеза о том, что аэродинамические силы в пульсирующем потоке в среднем являются такими же, как и в стационарном потоке (квазистационарная модель обтекания);
- пульсация аэродинамических сил линейно зависит от пульсаций скорости потока.

Ветровые потоки, имея крайне высокую степень стохастичности по времени и пространству, приближенно описываются некоторыми математическими функциями. Например, колебания ветра можно рассматривать как результат суммирования синусоидально изменяющихся ветров, наложенных друг

⁷ СТО НИУ МГСУ и НИЦ СтаДиО 02066523-089-1–2024. Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий : введ. 04.22.2024. М., 2024. 65 с.

⁸ Kwok K., Burton M., Abdelrazaq A. Wind-induced motion of tall buildings: designing for habitability. Reston : American Society of Civil Engineers, 2015. 77 p.

⁹ Howarth H. Human exposure to wind-induced motion in tall buildings: and assessment of guidance in ISO 6897 and ISO 10137 // Conference: 50th United Kingdom Conference on Human Responses to Vibration. 2015.

⁵ Ji Young Kim et al. Calibration of analytical models to assess wind-induced acceleration responses of tall buildings in serviceability level // Engineering Structures. 2009. No. 31 (9). Pp. 2086–2096.

⁶ Davenport A.G. Gust loading factors // Journal of the Structural Division. 1967. Vol. 93. No. 3. Pp. 11–34.

на друга к средней составляющей скорости ветра¹⁰. Эти синусоидальные вариации будут иметь различные частоты, амплитуды и фазы. Функция спектральной плотности мощности (энергетический спектр турбулентности) описывает соотношение между частотой и амплитудой синусоидально изменяющихся волн, составляя колебания скорости ветра, т.е. показывает доли мощности ветрового потока на бесконечно малый диапазон частот.

Описание случайной скорости с применением спектральной функции характеризует изменение скорости ветра во времени, однако ветровой поток меняется и по пространству. Простейшим является предположение о том, что пространственное распределение стабильно и пульсации скорости ветра происходят абсолютно синхронно во всех точках сооружения. Подобное приводит к тому, что пульсационная нагрузка будет завышена, что, безусловно, ведет к дополнительному запасу прочности, но в то же время для более точного описания воздействия на здания и сооружения необходимо учитывать корреляцию энергетического спектра по пространству. Более реалистичный подход использует понятие о корреляционной зависимости между пульсацией скорости в разных точках. Естественно, что в очень близко расположенных точках скорости различаются незначительно, но чем дальше точки расположены друг от друга, тем менее зависимы пульсационные компоненты скорости. Подобная корреляционная зависимость между пульсацией скоростей в разных точках $r_1 = (x_1, x_2, x_3)$ и $r_2 = (x_2, y_2, z_2)$ описывается приведенным расстоянием (к масштабу турбулентности), называемым коэффициентом пространственной корреляции $R_V(f, r_1, r_1)^{11}$.

¹⁰ Manwell J.F. Wind energy explained: Theory, design and application. New York : Wyle, 2009. DOI: 10.1002/9781119994367

¹¹ Попов Н.А. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000.

На рис. 2 показана последовательность определения динамической реакции системы на действие порывов ветра. Рассмотрим схему поэтапно:

- на входе системы представлена характеристика ветрового потока в виде функции скорости $V(t)$, которая имеет случайный характер. Порывы ветра порождают спектр пульсаций $S_V(\omega)$, отображающий распределение энергии по частотам;
- скорость ветра через аэродинамическую функцию передачи χ_v преобразуется в спектр аэродинамических сил $S_F(\omega)$. Это учитывает влияние конструктивных характеристик объекта на взаимодействие с воздушным потоком;
- аэродинамические силы вызывают ответную динамическую реакцию системы. При помощи передаточной функции χ_m рассчитывается спектр реакции $S_y(\omega)$, который характеризует распределение амплитуд колебаний системы в зависимости от частоты.

Спектр реакций зданий и сооружений разделяют на квазистатическую и динамическую составляющие [19, 20]. Квазистатическая часть соответствует безынерционной реакции системы, динамическая составляющая приводит к колебательному характеру движения конструкций зданий и сооружений.

В нормах различных стран используются разные подходы к определению пульсационной составляющей ветровой нагрузки. Так, например, в работах¹² [21–24] представлены сравнительные исследования различных зарубежных нормативных документов, регламентирующих ветровые нагрузки и воздействия.

Рекомендация нормативного документа СП 20.133-30.2016, допускающая ограничение частот и форм колебаний по трем нижшим собственным частотам и формам колебаний (двум изгибным и одной крутильной или смешанным крутильно-изгибным), связана со спектром ветрового воздействия, при кото-

¹² Kwon D.K., Kareem A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings // Engineering Structures. 2013. No. 51. Pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.01.008

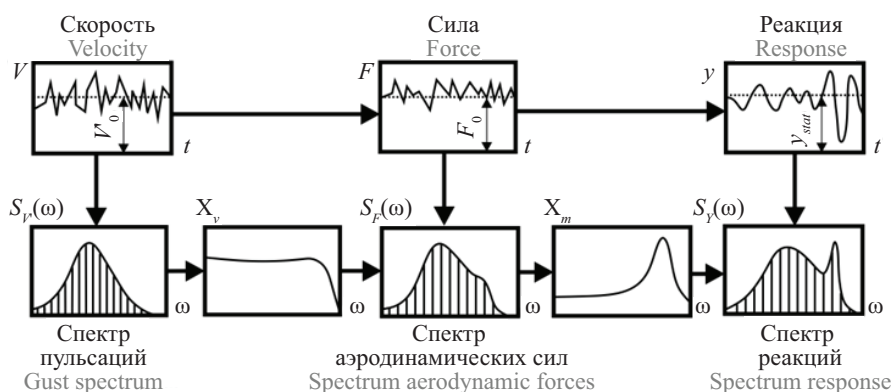


Рис. 2. Схема определения динамических реакций системы на действие пульсации ветра⁴

Fig. 2. Scheme for determining dynamic reactions of the system to the action of wind gusts⁴

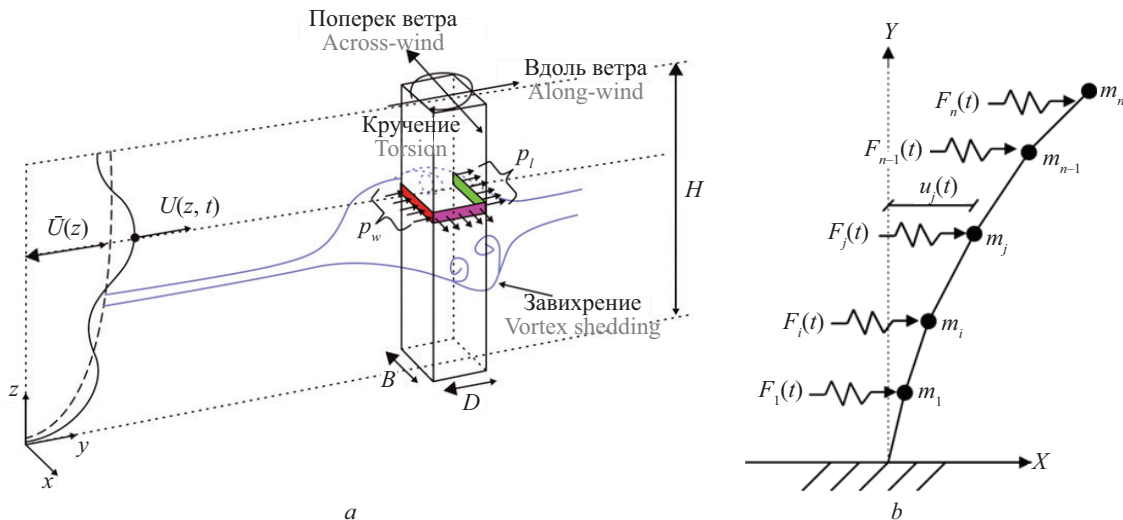


Рис. 3. Схема ветрового воздействия на высотное здание (а) и модель многомассовой консольной системы с распределенными по высоте аэродинамическими силами (б)

Fig. 3. Schematic of wind action on a high-rise building (a) and a model of a multi-mass cantilever system with height-distributed aerodynamic forces (b)

ром наиболее энергоемкий спектр ветрового воздействия реализуется на более низких частотах.

Для системы с одной степенью свободы решение задачи динамического расчета по схеме, указанной на рис. 2, дает возможность свести динамическую задачу к квазистатической. Для многомассовых систем (рис. 3, б) подход к определению динамического отклика зданий и сооружений при ветровом воздействии (рис. 3, а) сводится к задаче на основе разложения по собственным частотам и формам колебаний.

Существующие нормативные подходы пригодны для зданий и сооружений малой и средней высоты и при разреженной застройке. Для вопросов ветрового воздействия они не содержат рекомендаций по назначению аэродинамических коэффициентов для сложных по форме высотных зданий и сооружений, не учитывают влияние аэродинамической интерференции, рельефа, изменения спектра набегающего потока в условиях плотной и изменяющейся застройки, а также не способны учитывать поперечные, действующие перпендикулярно ветровому потоку, а также крутильные колебания (по причине базирования на спектре А. Давенпорта, описывающего энергетическое распределение турбулентных пульсаций скорости ветра вдоль направления основного ветрового потока), в отличие от предлагаемой в настоящей работе методики численного моделирования, которая охватывает и учитывает данные проблемы и недостатки имеющихся нормативных методик.

Таким образом, научная новизна данного исследования заключается в разработке методики численного моделирования динамического отклика высотных зданий и сооружений при ветровых воздействиях с разрешением спектра турбулентных пульсаций (вихре-разрешающая постановка) и учетом аэродинамической интерференции с окружающей застройкой на основе

нестационарного CFD-моделирования и прямого динамического конечно-элементного анализа. На апробационном примере башни «Эволюция», как здания, входящего в состав самого высотного комплекса зданий в России (ММДЦ «Москва-Сити»), показан пример использования данной методики и численные результаты моделирования динамического отклика при различных углах атаки ветра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках предложенной методики определение динамического отклика высотных зданий и сооружений разделяется на два этапа: аэродинамический и механический (механика конструкций). По этой причине будем рассматривать последовательную методику решения двух задач на примере башни «Эволюция».

Разработанная методика апробирована с использованием программных комплексов (ПК) семейства ANSYS. В частности, для решения задачи вычислительной гидрогазодинамики (CFD) применен ПК ANSYS Fluent. Для решения задачи механики конструкций — ПК ANSYS Mechanical APDL. С целью дополнительного сопоставления предлагаемой методики с результатами нормативного подхода СП 20.13330.2016 динамического отклика башни «Эволюция» в ПК Лира-САПР и SCAD была сконвертирована расчетная модель ANSYS, верифицированная по собственным частотам и формам колебаний конструкций.

Башня «Эволюция» имеет сложную архитектурную форму. Начиная со 2-го этажа, каждый этаж повернут на 3° относительно предыдущего, что в общей сложности составляет 135° . Благодаря этому башня выглядит как закручивающийся параллелепипед. Башня заканчивается короной, которая пред-

ставляет собой сочетание нескольких сложных рам и вертолетной площадки. Пятно застройки в уровне первого этажа представляет собой квадратную форму с максимальными размерами $36,0 \times 36,0$ м. Высота здания от уровня пола нулевого этажа составляет 245,95 м. Ядро жесткости — это блок монолитных железобетонных стен, лифтовых и лестничных узлов. Располагается в центре здания и является основным жестким элементом. Стены толщиной от 600 до 800 мм — по 51-й этаж включительно; 400 мм — на 52-м, 53-м и 54-м этажах. Свесы плит перекрытий за пределами кольца-октагона из восьми балок достигаются за счет продления этих балок консолями, разгружающими моменты в пятнадцатиметровых пролетах. Колонны в здании выполнены из монолитного железобетона. Поперечное сечение колонн круглое, прямоугольное и квадратное. Восемь внутренних колонн имеют круглое поперечное сечение (диаметр изменяется по высоте от 2100 до 1200 мм). По углам здания расположены четыре колонны с прямоугольным сечением (размер изменяется по высоте от 1500×1500 мм до 1000×1500 мм).

На рис. 4 представлены конечно-элементные модели (КЭМ) башни «Эволюция», выполненные в разных ПК (ANSYS Mechanical APDL, Лира-САПР и SCAD). Для создания модели в ANSYS Mechanical APDL использовались конечные элементы (КЭ)

Beam188 двухузловой для стержней и КЭ Shell181 трех- и четырехузловой для оболочек (пластин). Для создания модели в Лира-САПР применялись КЭ 42 универсальный трехузловой для оболочек (пластин), КЭ 44 универсальный четырехузловой для оболочек (пластин) и КЭ 10 универсальный двухузловой для стержней. Для создания модели в SCAD использовались КЭ 42 универсальный трехузловой для оболочек (пластин), КЭ 44 универсальный четырехузловой для оболочек (пластин) и КЭ 5 универсальный двухузловой для стержней. Размерность КЭМ составляет 205 265 элементов и 159 926 узлов. На КЭМ принимались расчетные нагрузки: собственный вес здания, полезная и ветровая нагрузки. Свойства материала приняты для бетона класса В80. Модель материала — линейно-упругая.

Модель башни, выполненная в ANSYS Mechanical APDL, использовалась для прямого динамического анализа отклика здания на ветровые воздействия. Расчетные модели Лира-САПР и SCAD применялись для определения динамического отклика согласно отечественным нормативным документам СП20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Точки мониторинга (для построения графиков искомых переменных во времени) представляют собой четыре точки на уровне краев выступающей части плиты покрытия,

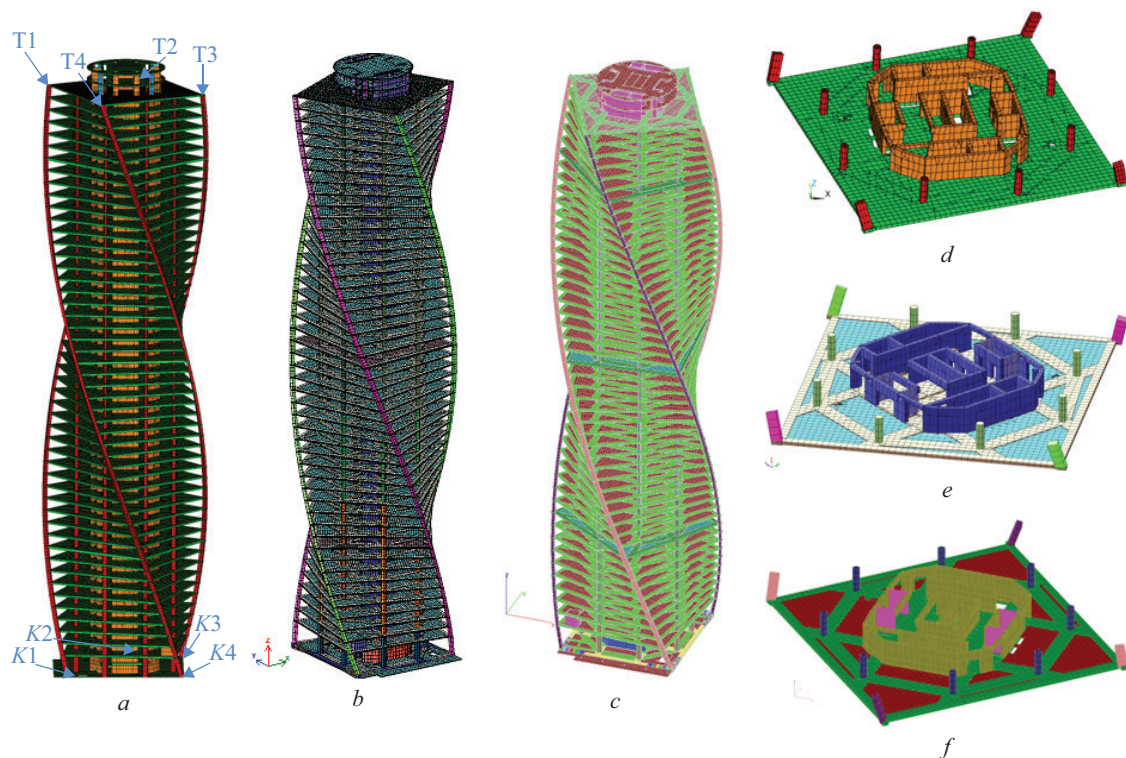


Рис. 4. Конечно-элементная модель башни «Эволюция» в программных комплексах ANSYS Mechanical APDL (a); Лира-САПР (b) и SCAD (c); фрагмент конечно-элементной модели этажа в ANSYS Mechanical APDL (d); Лира-САПР (e) и SCAD (f)

Fig. 4. Finite element model of the “Evolution” tower in ANSYS Mechanical APDL (a); Lira-SAD (b) and SCAD (c); fragment of finite element model of the floor in ANSYS Mechanical APDL (d); Lira-SAD (e) and SCAD (f)

а для колонн — четыре по контуру первого этажа (рис. 4).

Определение собственных частот и форм колебаний механических систем — едва ли не самые информативные верификационные задачи, интегрирующие многие факторы и параметры расчетной модели и в то же время позволяющие выявить их различие. В табл. 1 представлены числовые значения собственных частот колебаний башни «Эволюция», вычисленные в разных ПК (Δ_{12} означает разницу между ANSYS MAPDL и Лира-САПР, Δ_{13} — разница между ANSYS MAPDL и SCAD, Δ_{23} — разница между Лира-САПР и SCAD). На рис. 5 показаны первые 6 собственных частот и форм колебаний, вычисленные в ПК ANSYS Mechanical APDL.

При сравнении результатов расчета собственных частот и форм колебаний башни «Эволюция» в ПК Лира-САПР и SCAD была отмечена довольно хорошая сходимость. Небольшие различия в результатах, полученных с помощью ANSYS Mechanical APDL, связаны с использованием различных теоретических моделей для оболочек и пластин: применяются балочные модели Тимошенко и пластины по теории

Мидлина – Рейснера, которые учитывают влияние поперечного сдвига. Несмотря на это, полученные результаты также близки.

В линейных системах динамики конструкций внутренняя нагрузка линейно пропорциональна узловым перемещениям, а матрица жесткости системы остается неизменной. Уравнение движения в матричной форме метода конечных элементов можно записать в следующем виде¹³:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\},$$

(1)

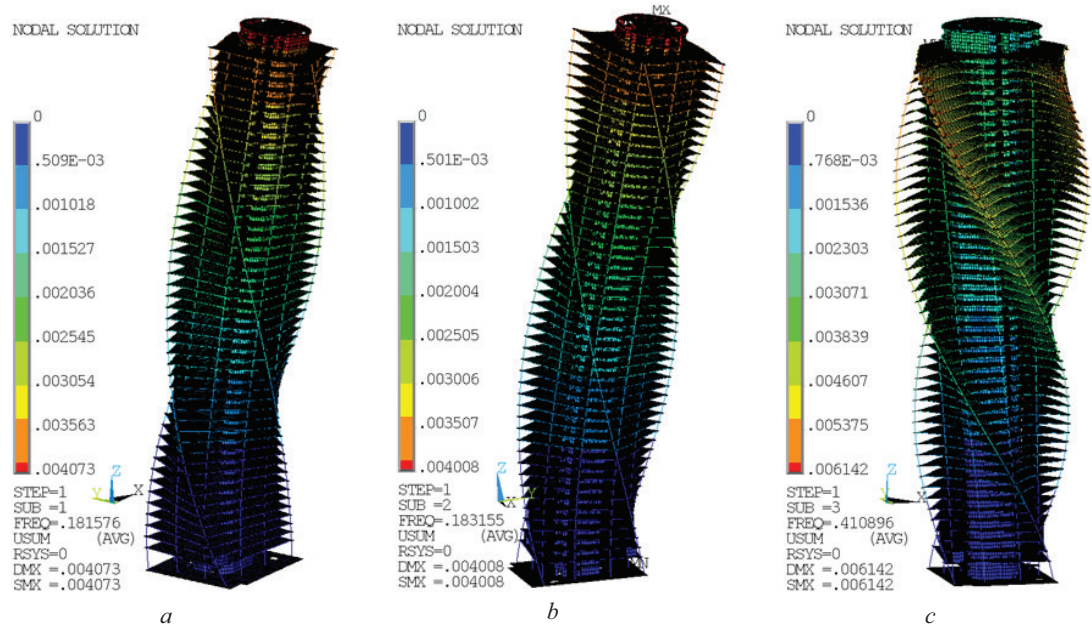
где $[M]$ — глобальная матрица масс; $\{\ddot{u}\}$ — вектор, характеризующий узловые ускорения; $[C]$ — глобальная матрица демпфирования; $\{\dot{u}\}$ — вектор, характеризующий узловые скорости; $[K]$ — глобальная матрица жесткости системы; $\{u\}$ — вектор, характеризующий узловые перемещения; $\{F^a\}$ — функция, характеризующая нагрузки как функцию от времени.

Система уравнений (1) разрешается методом Ньюмарка. Семейство алгоритмов интегрирования Ньюмар-

¹³ Theory Reference (2024) Release 2024R1. ANSYS Inc., Canonsburg.

Табл. 1. Собственные частоты колебаний башни «Эволюция» в разных программных комплексах
Table 1. Natural frequencies of vibrations of the “Evolution” tower in different programme complexes

Программный комплекс/собственные частоты Software package/natural frequencies	ANSYS MAPDL	Лира-САПР Lira-SAPR	SCAD	Δ_{12} , %	Δ_{13} , %	Δ_{23} , %
f_1 , Гц / Hz	0,1816	0,1747	0,1746	3,80	3,86	0,06
f_2 , Гц / Hz	0,1832	0,1836	0,1831	0,22	0,06	0,27
f_3 , Гц / Hz	0,4109	0,4354	0,4320	5,96	5,14	0,78
f_4 , Гц / Hz	0,6811	0,7125	0,7092	4,61	4,13	0,46
f_5 , Гц / Hz	0,8138	0,7940	0,7930	2,43	2,56	0,13
f_6 , Гц / Hz	1,0913	1,1866	1,1850	8,73	8,30	0,86



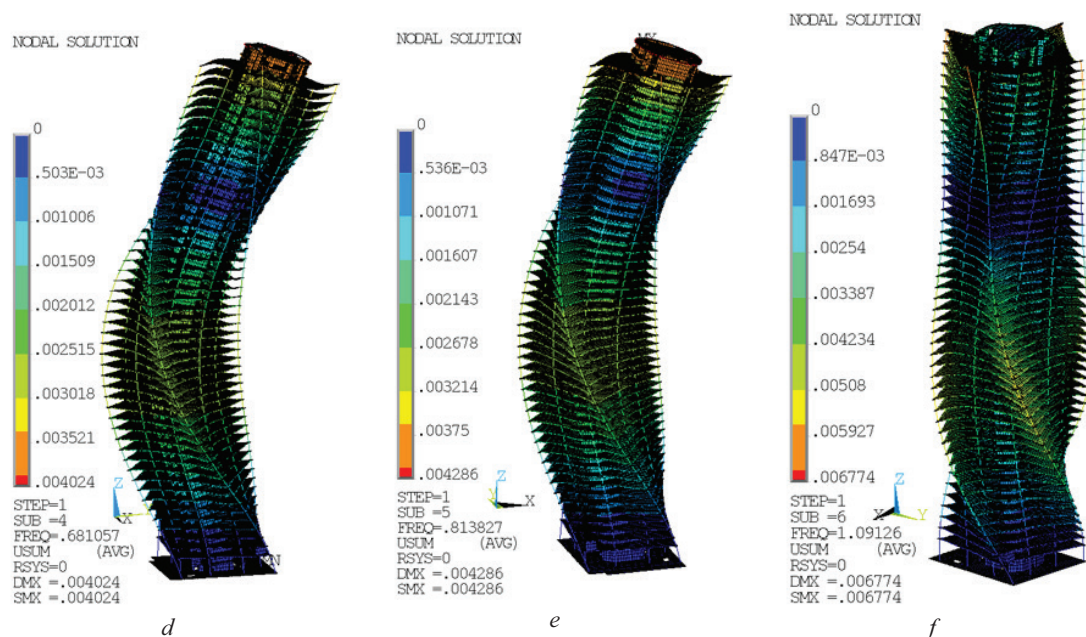


Рис. 5. Собственные частоты и формы колебаний башни «Эволюция», вычисленные в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL

Fig. 5. Natural frequencies and mode shapes of the “Evolution” tower calculated in the ANSYS Mechanical APDL programme complex

ка является одним из самых популярных методов интегрирования во времени как одношаговый алгоритм, который зарекомендовал себя в практике для задач неявной динамики в механике деформируемых твердых тел. Полудискретное уравнение движения, приведенное в уравнении (1), можно переписать как:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\}, \quad (2)$$

где $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ — вектор узловых ускорений $\{\ddot{u}(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) ; $\{\dot{u}_{n+1}\}$ — вектор узловых скоростей $\{\dot{u}(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) ; $\{u_{n+1}\}$ — вектор узловых перемещений $\{u(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) ; $\{F_{n+1}^a\}$ — вектор приложенных узловых нагрузок $\{F_{n+1}^a(t_{n+1})\}$ в момент времени (t_{n+1}) .

В дополнение к уравнению (2) семейство алгоритмов интегрирования во времени Ньюмарка требует обновления перемещений и скорости следующим образом:

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1-\delta)\{\ddot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t; \quad (3)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}\right]\Delta t^2, \quad (4)$$

где α и δ — параметры интегрирования Ньюмарка $\left(\delta \geq \frac{1}{2}, \alpha \geq \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2} + \delta\right)^2\right)$.

В конечном итоге схема интегрирования Ньюмарка состоит из трех уравнений конечных разностей, представленных в уравнении (2) через уравне-

ние (3) и (4), а также трех неизвестных $\{\ddot{u}_{n+1}\}$, $\{\dot{u}_{n+1}\}$ и $\{u_{n+1}\}$, которые могут быть численно вычислены с помощью трех алгебраических уравнений вместе с тремя известными величинами $\{\ddot{u}_n\}$, $\{\dot{u}_n\}$ и $\{u_n\}$.

Используя три уравнения (2)–(4), одношаговый алгоритм в терминах неизвестной $\{u_{n+1}\}$ и трех известных величин можно записать как:

$$\begin{aligned} & (\alpha_0[M] + \alpha_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} = \\ & = \{F_{n+1}^a\} + [M](\alpha_0\{u_n\} + \alpha_2\{\dot{u}_n\} + \alpha_3\{\ddot{u}_n\}) + \\ & + [C](\alpha_1\{u_n\} + \alpha_4\{\dot{u}_n\} + \alpha_5\{\ddot{u}_n\}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}$, $\alpha_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}$, $\alpha_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}$, $\alpha_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$, $\alpha_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$, $\alpha_5 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\alpha} - 2\right)$ — параметры интегрирования.

В литературе, посвященной динамическим расчетам, различные авторы используют разные модели демпфирования, это отличие нашло применение и в нормативных документах, где применяются формы представления внутренних потерь. Одна из наиболее популярных моделей демпфирования — модель Рэлея (также известная как пропорциональное демпфирование) основана на предположении, что демпфирование линейно зависит от комбинации жесткости и массы конструкции. Демпфирование в этой модели описывается матрицей демпфирования $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$. Учет демпфирующих свойств на основе рэлеевского демпфирования [25–27] выполняется через коэффициенты α (пропорциональности масс) и β (пропорциональности жесткости), посчитанные на основе круговых частот колебаний конструкции ω_i и ω_j . Вычисление

коэффициентов (при допущении, что коэффициенты демпфирования ξ равны по различным частотам) про- исходит по следующим формулам:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}; \quad \alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j};$$
$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j}.$$
(6)

Декремент колебаний от принятого ξ (параметр затухания в долях от критического) для железобетон- ных сооружений: $\delta = 2\pi\xi = 0,05 \cdot (2 \cdot 3,142) = 0,3142$.

При использовании модели демпфирования Рэ- лее для динамического анализа высотных зданий при ветровых воздействиях важно правильно выбрать частоты, на основе которых будут рассчитываться ко- эффициенты демпфирования α и β , так как ветровые нагрузки — это переменные во времени и могут при- водить к резонансным явлениям. Для высотных зда- ний, которые подвержены ветровым воздействиям, не- обходимо учитывать два основных диапазона частот:

1. Низкочастотный диапазон, связанный с обще- системными колебаниями конструкции (обычно это низшие собственные частоты здания).

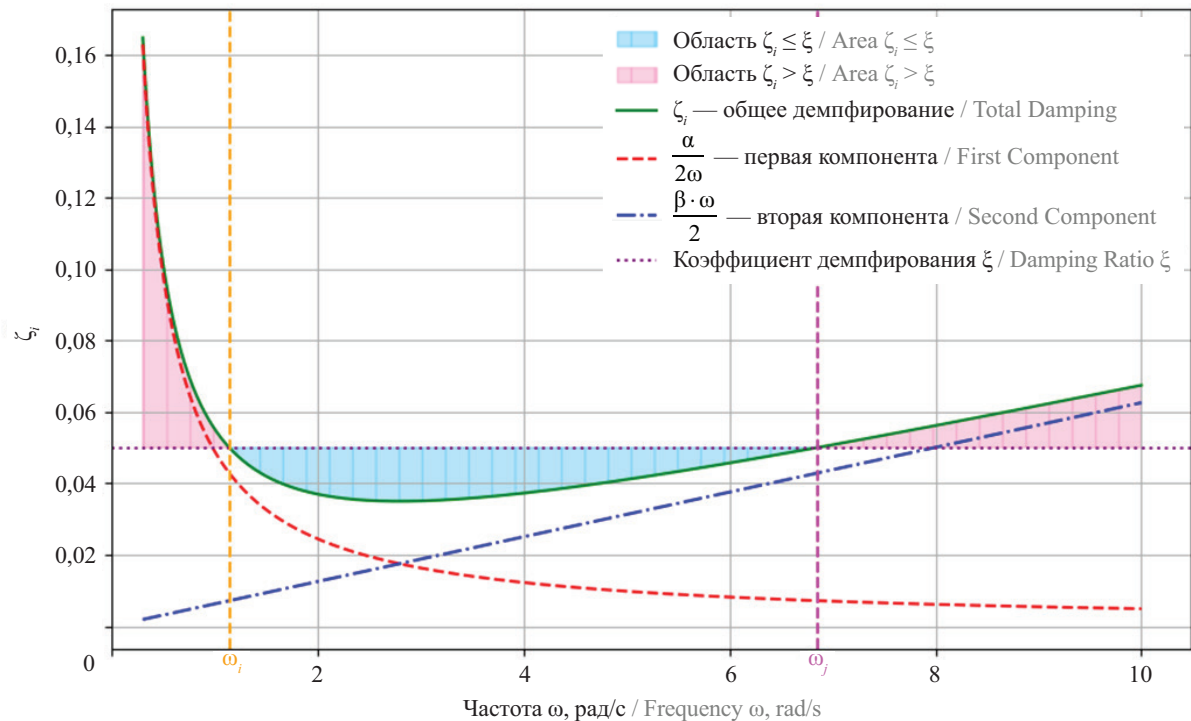
2. Высокочастотный диапазон, возникающий в результате локальных колебаний и пульсаций ветра, которые также могут влиять на элементы конструк- ции. В основном они важны для фасадных и кровель- ных конструкций, имеющих собственные частоты колебаний, превышающие общесистемные (всей кон- струкции).

При неправильном подборе данных частот воз- можны как эффекты чрезмерного демпфирования

высокочастотного диапазона (в случае выбора двух близких частот, например первой и второй), пример которого показан на рис. 6, *b* — оранжевый график, так и случай «провала демпфирования», когда частоты на значительном интервале (между первой и *n*-й) слишком отдалены друг от друга (рис. 6, *b* — синий график).

Для высотных зданий первые несколько соб- ственных частот, соответствующих основным формам колебаний, являются наиболее важными для оценки динамического отклика. Как правило, это частоты, свя- занные с колебаниями в горизонтальной плоскости (из- гибные формы), а также крутильные колебания. В качестве первой частоты, используемой для вычисления, обычно используют самую низшую частоту колеба- ний системы. В качестве второй частоты — низшую из трех собственных частот колебаний (при обяза- тельном наличии двух изгибных и одной крутильной или смешанных крутильно-изгибных форм колеба- ний), либо частоту из диапазона высокочастотных ко- лебаний, которые представляют собой либо пульсации ветра, либо локальные колебания конструкций (напри- мер, вторичные формы или высокочастотные отклики фасадных элементов), которые можно брать исходя из предельного значения собственной частоты f_{lim} (табл. 11.5 СП 20.13330.2016).

В связи с данной неопределенностью можно сфор- мулировать общие рекомендации к выбору частот для вычисления коэффициентов рэлеевского демпфи- рования. При этом следует учитывать, что спектр аэро- динамической силы ветра охватывает только наиболее энергоемкую часть частотного спектра высотного здания. Это означает, что при анализе динамического



a

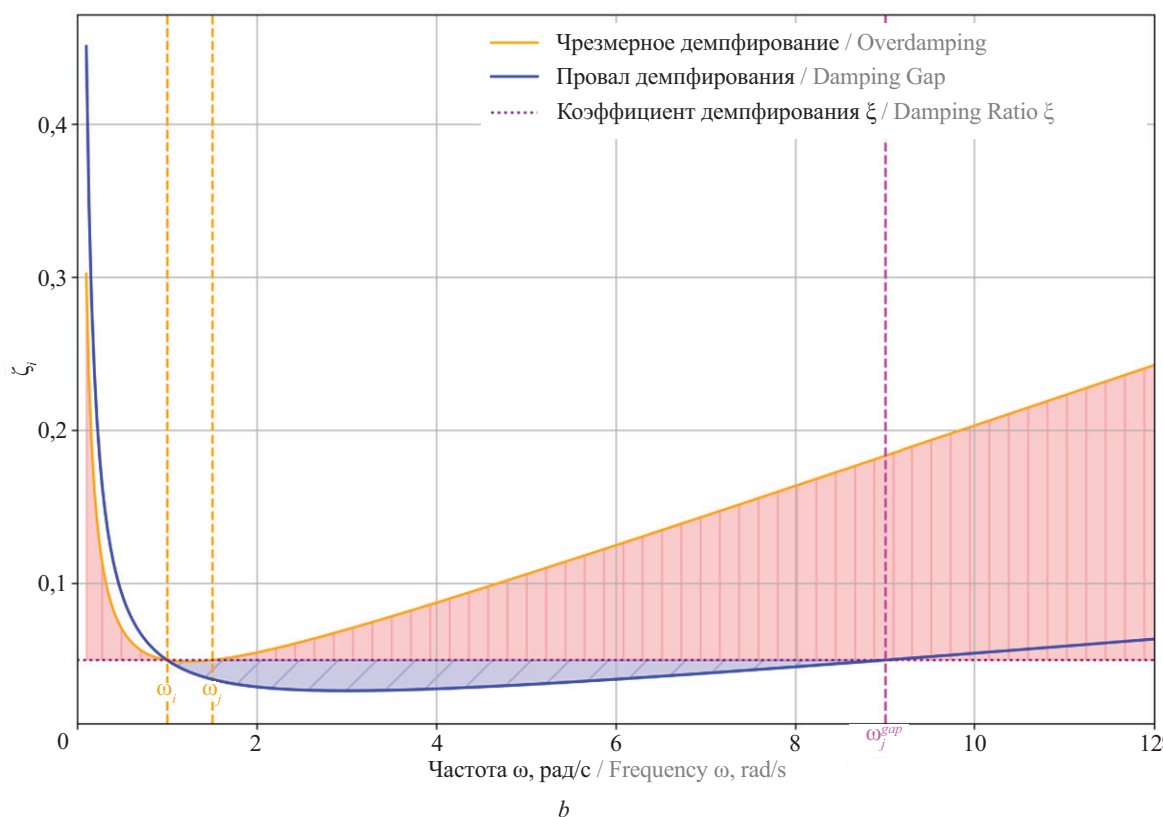


Рис. 6. Графики рэлеевского демпфирования: *a* — выбранные параметры демпфирования для рассматриваемой задачи; *b* — эффекты чрезмерного демпфирования и «провала демпфирования» при неправильном подходе к подбору частот ω_i и ω_j

Fig. 6. Rayleigh damping plots: *a* — the selected damping parameters for the considered problem; *b* — the effects of excessive damping and “damping failure” in case of wrong approach to frequency selection ω_i and ω_j

отклика здания на ветровые воздействия имеет смысл сосредоточиться на собственных частотах, лежащих в этой энергоемкой области (см. раздел Результаты исследования). Учитывая это, нет необходимости выбирать в качестве второй частоты для расчетов значения, превышающие эту область, поскольку они не внесут существенного вклада в динамический отклик конструкции под действием ветра, но приведут к «провалу демпфирования» и к недоучету диссипативных свойств системы. Согласно описанному выше подходу, в настоящей статье в качестве первой частоты взята первая собственная частота колебаний башни «Эволюция», в качестве второй частоты — ближайшая собственная частота колебаний, соответствующая концу наиболее энергоемкого интервала спектра аэродинамической силы (см. раздел Результаты исследования), соответствующая 6-й собственной частоте колебаний.

В односвязанной (или жесткой) постановке, когда ветровые потоки влияют на здание, но колебание здания не влияет на ветровой поток, вследствие применения гипотезы о малости отклонений высотного здания по сравнению с его высотой, вычисленные из результатов CFD-моделирования аэродинамические силы используются в качестве вектора зависимых от времени t и высоты z величин $F_i(z, t)$ в уравнениях (1), (2) и (5), представляющие собой поэтажные

силы F_x , F_y и крутящий момент M_z . Данные силы и моменты необходимы для механического конечно-элементного анализа НДС. Функции вычисления интегральных сил и моментов присутствуют во всех промышленных ПК CFD. Эти функции учитывают вклад статического давления, направленного по нормали к поверхностям, и напряжения сдвига, направленного по касательной к поверхностям. Для большинства зданий и сооружений вклад напряжений сдвига незначителен и может быть проигнорирован⁷.

По своей сути ветровое давление есть функция от пространственных координат и времени: $p(x, y, z, t)$. Однако в таком виде прикладывать ветровые давления в практических задачах оказывается неудобным. Для решения проблемы в контексте применения к высотным зданиям предлагается приводить поэтажные погонные ветровые нагрузки для каждой зоны сбора аэродинамических нагрузок. Основная концепция заключается в представлении неравномерно распределенной ветровой нагрузки по периметру этажа как комбинации трех равномерно распределенных составляющих: вдоль глобальных осей f_x, f_y и касательной нагрузки f_τ (рис. 7). Эта декомпозиция позволяет заменить совокупность локальных ветровых воздействий на одну результирующую силу и момент в соответствии с положениями теоремы теоретической механики о равнодействующей

силе и моменте для абсолютно жесткого тела, что близко к действительности для перекрытия, нагруженного в своей плоскости.

Разложение на равномерно распределенные составляющие производится следующим образом:

$$F_x = \oint_l f_x dl = f_x \oint_l dl = f_x L, \quad (7)$$

где $f_x = F_x/L$. Аналогично $f_y = F_y/L$.

Для крутящего момента M_z вклад будет давать только равномерно распределенная система сил $\vec{f}_\tau$, в то время как вклад в момент для сил f_x, f_y будет равен нулю, если начало координат находится в центре масс периметра рассматриваемого сечения. Вывод для равномерно распределенной системы сил $\vec{f}_\tau$ представляется так:

$$\begin{aligned} M_z &= \oint_l [\vec{r}, \vec{f}_\tau]_z dl = \oint_l \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x & y & 0 \\ f_{\tau,x} & f_{\tau,y} & 0 \end{vmatrix} dl = \\ &= \oint_l \begin{vmatrix} x & y \\ f_{\tau,x} & f_{\tau,y} \end{vmatrix} dl = \oint_l (xf_{\tau,y} - yf_{\tau,x}) dl = \\ &= \oint_l f_\tau (x \cos(\beta) - y \cos(\alpha)) dl = \\ &= \oint_l f_\tau \left(\oint_l x \cos(\beta) dl - \oint_l y \cos(\alpha) dl \right) = \\ &= \oint_l f_\tau \left(\oint_l x dy - \oint_l y dx \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $f_\tau = M_z / \left(\oint_l x dy - \oint_l y dx \right)$. Криволинейный интеграл второго рода $\oint_l (x dy - y dx)$ зависит от направления обхода контура при интегрировании. Для согласования с направлением f_τ необходимо при взятии данного интеграла совершать обход против часовой стрелки. Численная реализация данного интеграла представляется в следующем виде:

$$L \approx \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2};$$

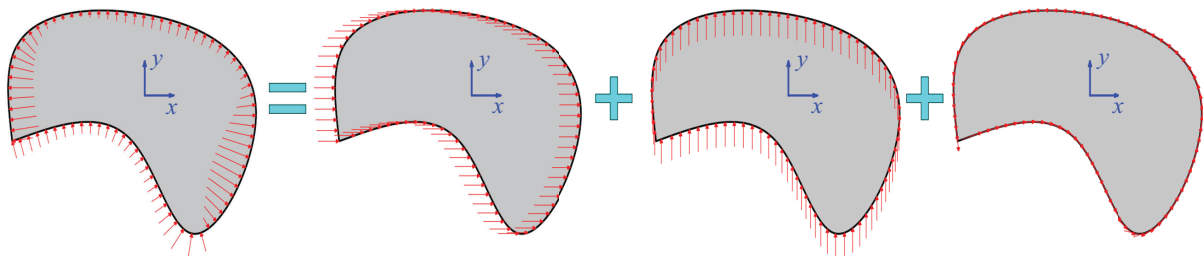


Рис. 7. Схема разложения ветровой нагрузки на три равномерно распределенные составляющие для перекрытия произвольной формы

Fig. 7. Scheme of wind load decomposition into three uniformly distributed components for a slab of arbitrary shape

$$\begin{aligned} \oint_l x dy - y dx &\approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_{i+1} + x_i)(y_{i+1} - y_i) - \\ &- (y_{i+1} + y_i)(x_{i+1} - x_i) = \sum_{i=1}^N x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i. \end{aligned} \quad (9)$$

Определение аэродинамических сил ветра на здания и сооружения основано на методах вычислительной гидрогазодинамики, представляющих собой мощный инструмент численного анализа, используемый для моделирования течений жидкостей и газов в различных инженерных и научных приложениях. В частности, для моделирования ветровых потоков и их взаимодействия с высотными зданиями и сооружениями задача сводится к численному решению системы трехмерных, нестационарных и нелинейных уравнений Навье – Стокса. При решении практических задач по определению ветровых нагрузок на здания и сооружения используются различные упрощения и гипотезы, оправданные спецификой физического процесса и требуемой точности вычислений. В частности, ветровые потоки могут рассматриваться как несжимаемые и изотермические, что означает пренебрежение изменениями плотности и температуры воздуха. Также в большинстве случаев исключается влияние внешних массовых сил, что упрощает задачу до учета исключительно аэродинамических сил и взаимодействий. Тогда итоговые уравнения гидрогазодинамики примут вид:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \nu \Delta \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (10)$$

где $\vec{u}$ — вектор скорости потока, м/с; t — время, с; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — дифференциальный оператор Лапласа; ρ — плотность воздуха, кг/м³; p — давление, Па.

Также необходимо выполнение уравнений неразрывности и состояния:

$$\text{div}(\vec{u}) = 0; \quad (11)$$

$$\rho = \text{const.} \quad (12)$$

Численное решение систем уравнений (10)–(12) с учетом начальных и граничных условий реализуется за счет моделирования турбулентности, для которого выделяют 4 основных подхода:

1. DNS (Direct Numerical Simulation) — прямое численное моделирование. В этом подходе система уравнений гидрогазодинамики (10)–(12) разрешается напрямую для всех пространственно-временных масштабов турбулентности. Требования к вычислительным ресурсам чрезвычайно высоки, поскольку для корректного моделирования необходимо разрешать течение до колмогоровских масштабов турбулентности, что включает учет самых малых вихрей и их динамики. Ввиду ограничений современных вычислительных мощностей данный подход применим исключительно для задач при низких числах Рейнольдса и в основном используется в фундаментальных исследованиях с помощью суперкомпьютеров.

2. LES (Large Eddy Simulation) — моделирование крупных вихрей. Этот метод предполагает пространственное осреднение уравнений Навье – Стокса. Для этого применяется неявный фильтр, позволяющий отделить крупномасштабные вихри, которые разрешаются непосредственно, от маломасштабных вихрей, моделируемых на основе подсеточной модели турбулентности. Разрешение происходит на уровне размеров ячеек расчетной сетки, которая представляет собой совокупность конечных объемов. LES эффективно применяется для моделирования крупных вихрей в зонах отрыва.

3. URANS/RANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier – Stokes) — осредненные по Рейнольдсу (осредненные по времени) уравнения Навье – Стокса. В данном подходе скорость потока представляется как сумма осредненной и пульсационной составляющих. В результате возникают дополнительные напряжения Рейнольдса (турбулентные напряжения $(\tau_{ij}^T = \rho \overline{u'_i u'_j})$), которые вводят шесть новых неизвестных в уравнения. Для их определения используются полуэмпирические модели турбулентности. В рамках RANS-подхода все турбулентные вихри моделируются без явного разрешения, как это происходит в DNS и LES.

4. Совокупность методов LES и RANS породила класс *гибридных моделей турбулентности*, которые сочетают преимущества обоих подходов. LES обеспечивает высокую точность при моделировании отрывных течений, тогда как RANS более эффективно моделирует пристенные течения при меньших вычислительных затратах.

В настоящей работе используется гибридная модель SBES¹⁴ (Stress-Blended Eddy Simulation). Модель объединяет точность осредненных характеристик и пульсаций в отрывных и пристенных областях потока при высоких числах Рейнольдса, используя доступ-

ные на текущий момент вычислительные ресурсы. Переход между RANS и LES моделями осуществляется посредством функции переключателя (моделирование вихрей со смешанным напряжением) f_s :

$$\begin{aligned}\tau_{ij}^{SBES} &= f_s \cdot \tau_{ij}^{RANS} + (1 - f_s) \cdot \tau_{ij}^{LES}; \\ \mu_t^{SBES} &= f_s \cdot \mu_t^{RANS} + (1 - f_s) \cdot \mu_t^{LES},\end{aligned}\quad (13)$$

где τ_{ij}^{RANS} , τ_{ij}^{LES} — тензор напряжений (RANS/LES), Па; μ_t^{RANS} , μ_t^{LES} — турбулентная вязкость (RANS/LES), Па·с.

Для исследования явления аэродинамической интерференции, вызванного влиянием соседних высотных зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити», следует корректно рассчитать ветровую нагрузку на сооружения, а также учесть перераспределение ветрового потока после его взаимодействия со зданиями. Использование модели турбулентности SBES предоставляет возможность детально описать динамику крупных, энергоемких турбулентных структур в свободном потоке, разрешаемых посредством подсеточной модели LES-WALE, одновременно эффективно моделируя пристенные течения с помощью подхода RANS. Это позволяет достичь высокой точности как в отрывных областях потока, так и в пристенных зонах, что критически важно для моделирования взаимодействий потоков в сложной городской среде.

В ПК ANSYS Fluent для численного решения используется метод конечных (контрольных) объемов (МКО). Этот подход преобразует скалярное уравнение переноса (14) в алгебраическую форму (15), которая может быть эффективно решена численными методами. Такой подход дает возможность детально моделировать перенос массы, импульса и энергии в сложных геометриях, что особенно важно при анализе аэродинамических явлений в условиях интерференции и турбулентности:

$$\underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{нестационарность}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A}}_{\text{конвекция}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A}}_{\text{диффузия}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{генерация}}, \quad (14)$$

где ϕ — искомая скалярная величина; V — объем ячейки, м³; $\vec{u}$ — вектор скорости $(= u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k})$, м/с; $\vec{A}$ — вектор площади поверхности ячейки, м²; Γ_ϕ — коэффициент диффузии для ϕ ; $\nabla \phi$ — градиент искомой величины $\phi \left(= \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{k} \right)$; S_ϕ — массовые силы или источник.

Метод конечных объемов базируется на интегральном представлении фундаментальных законов сохранения — массы, импульса и энергии. Для его реализации расчетная область разбивается на совокупность конечных (контрольных) объемов с помощью сеточной структуры. Внутри каждого конечного объема располагаются узлы, в которых производится

¹⁴ ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg : ANSYS Inc., 2020.

вычисление искомых параметров. Путем интегрирования уравнения переноса (14) по каждому конечно-объему удастся преобразовать дифференциальное уравнение в дискретную форму, что приводит к получению системы алгебраических уравнений (15), выражающих локальные законы сохранения. Эти дискретные уравнения характеризуют поведение физических величин в пределах каждого конечного объема и учитывают вклад соседних конечных объемов, что обеспечивает точное описание сложных процессов переноса в вычислительной области:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f \cdot \vec{A}_f = \\ = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V, \end{aligned} \quad (15)$$

где N_{faces} — количество граней, образующих конечный объем; ϕ_f — величина ϕ конвектирующая через поверхность; $\rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f$ — массовый поток через поверхность; $\vec{A}_f$ — вектор площади поверхности f , $|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$; $\nabla \phi_f$ — градиент ϕ на поверхности f .

Геометрическая модель создавалась в ПК ANSYS SpaceClaim и представлена на рис. 8. Разработка конечно-объемной сетки высотного комплекса осуществлялась в ANSYS Meshing и ANSYS Fluent. Размерность конечно-объемных моделей составляет 6 916 910 вычислительных ячеек на основе метода генерации

с полигэксэдрической сеткой. Конечно-объемные сетки показаны на рис. 9–11. Параметры конечно-объемной сетки выбраны на основе рекомендаций стандарта организации СТО¹⁵, выпущенного НИУ МГСУ (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова) и Научно-исследовательским центром СтаДиО. Размер поверхностной сетки на «Эволюции» — 1 м, на прочих зданиях — 2 м, размер сетки в объеме по мере удаления от объекта — 4, 8 и 32 м. Аэродинамическая модель башни «Эволюция» разделена на 54 этажа, используемые для сбора ветровой нагрузки на здание. Численное моделирование осуществлялось с восемью углами атаки ветра. Направления рассматриваемых углов атаки ветра представлены на рис. 12.

В расчетной аэродинамической модели учтены следующие здания: «Башня на Набережной: С», «Башня на Набережной: В», «Федерация: Запад», «Город Столиц: Москва», «Город Столиц: Санкт-Петербург», «Империя», «Меркурий», «ОКО: Северная башня», «Эволюция», «Евразия», «ОКО: Южная башня», «IQ-квартал: Башня 3», «IQ-квартал: Башня 2», «Федерация: Восток», «Neva Towers: Башня 1», «Neva Towers: Башня 2», «Moscow Towers: Башня 1», «Moscow Towers: Башня 2», мост «Багратион», «Афи-

¹⁵ СТО НИУ МГСУ и НИЦ СтаДиО 02066523-089-1–2024. Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий : введ. 22.04.2024. М., 2024. 65 с.

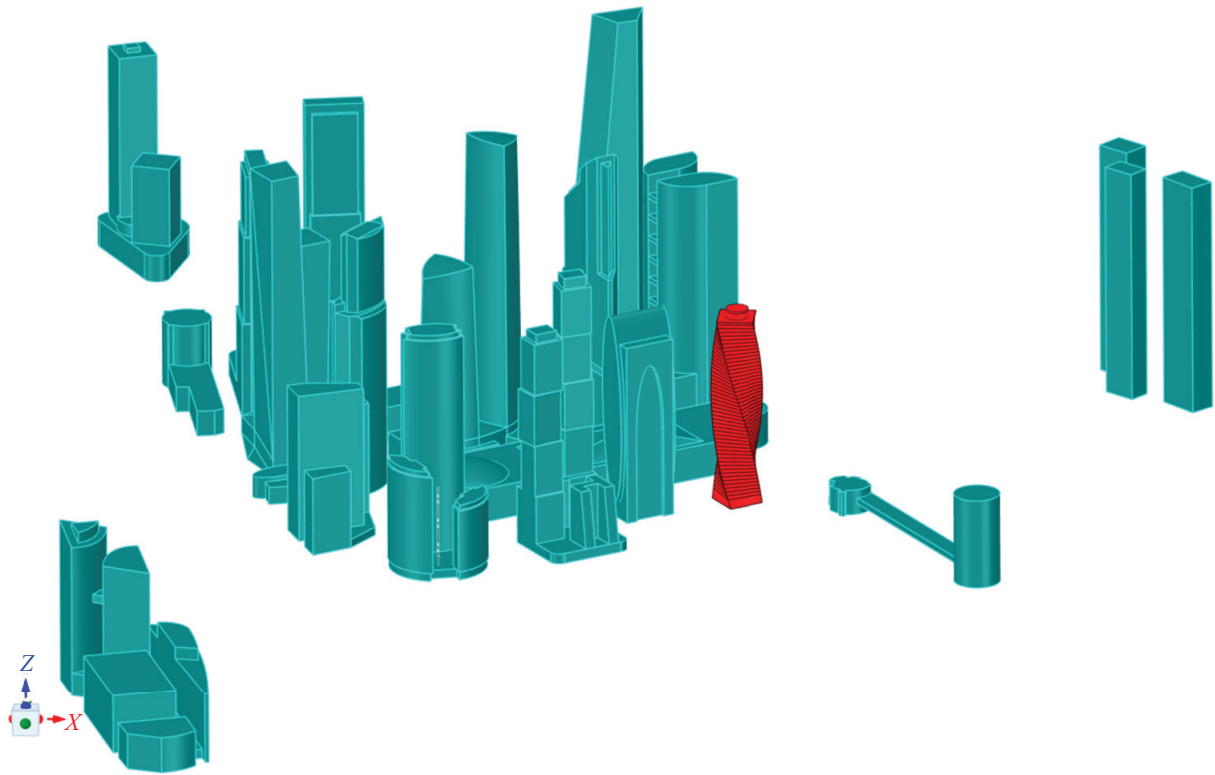


Рис. 8. Геометрическая модель ММДЦ «Москва-Сити» и окружающих высотных зданий в ANSYS SpaceClaim. Красным цветом отмечена башня «Эволюция» с поэтажной разрезкой (для сбора аэродинамических нагрузок)

Fig. 8. Geometric model of MIBC “Moscow-City” and surrounding high-rise buildings in ANSYS SpaceClaim. The red color indicates the “Evolution” tower with floor-by-floor section (to gather aerodynamic loads)

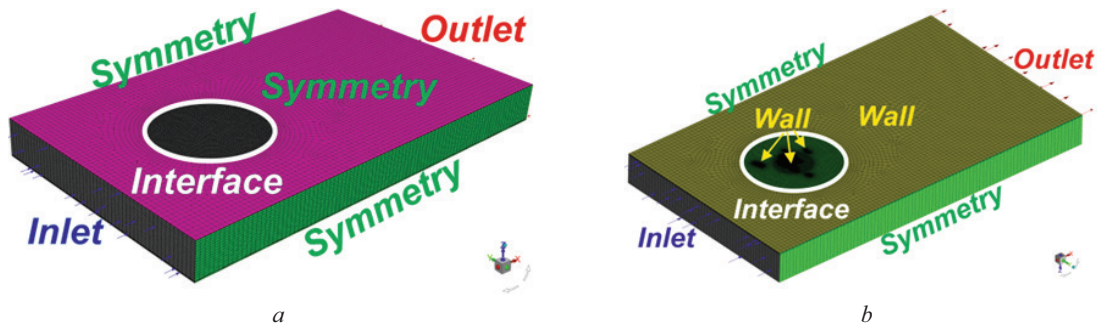


Рис. 9. Конечно-объемная сетка с указанием граничных условий для CFD-моделирования: вид сверху (a) и вид снизу (b)
Fig. 9. Finite-volume mesh showing boundary conditions for CFD modelling: top view (a) and bottom view (b)

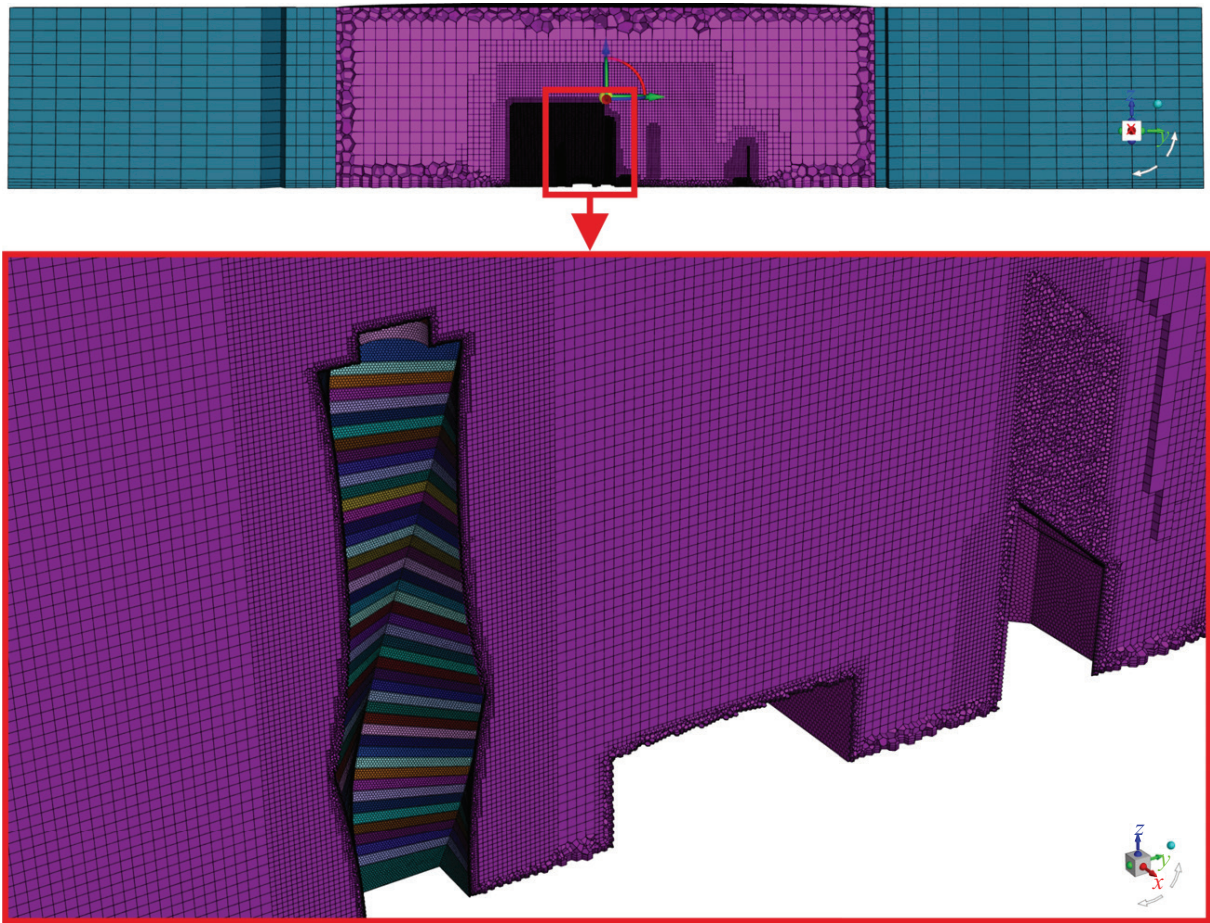


Рис. 10. Разрез конечно-объемной сетки вблизи башни «Эволюция»
Fig. 10. Finite-volume grid section in the vicinity of the “Evolution” tower

молл Сити», «Capital Towers», «Сбербанк-Сити», «One Tower» (перспективное здание в застройке комплекса).

В процессе выполнения нестационарных аэродинамических расчетов одним из наиболее критичных параметров является величина временного шага и размеров конечно-объемной сетки. Правильный выбор шага по времени и размеров конечно-объемной сетки оказывает значительное влияние на точность и эффективность моделирования сложных физических процессов, таких как вихреобразование

и турбулентность. В частности, данные параметры будут влиять на степень разрешения спектра турбулентных пульсаций. В LES-моделировании размер элемента служит неявным фильтром, отделяющим крупномасштабные вихри, которые разрешаются непосредственно от маломасштабных вихрей, моделируемых на основе подсеточной модели турбулентности. Нестационарная вихреразрешающая постановка позволяет напрямую определить статистические характеристики искомых величин при условии разрешения около 80 % спектра кинетической энергии

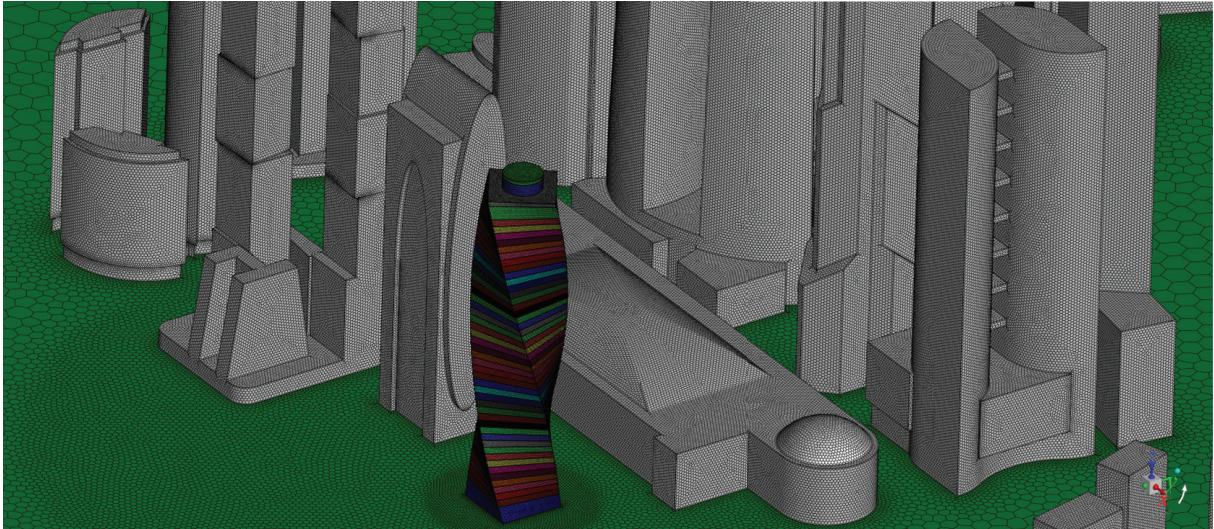


Рис. 11. Поверхностная конечно-объемная сетка на зданиях комплекса ММДЦ «Москва-Сити»

Fig. 11. Surface finite-volume mesh on the buildings of the MIBC “Moscow-City”

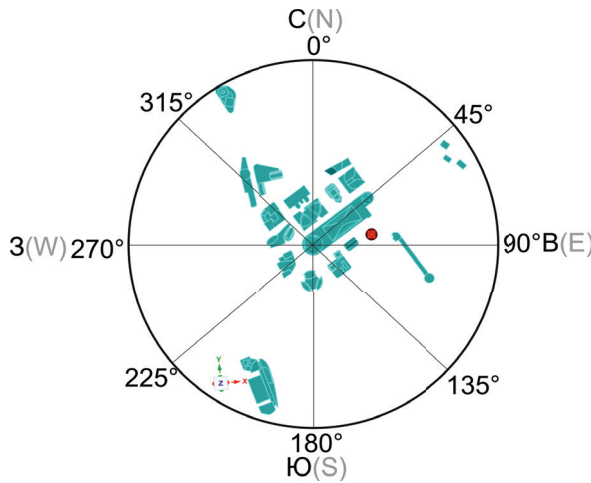


Рис. 12. Направления углов атаки ветра, для которых проводилось CFD-моделирование и моделирование динамического отклика башни «Эволюция» (здание отмечено красным цветом)

Fig. 12. The directions of wind attack angles for which CFD modelling and dynamic response simulations of the “Evolution” tower were performed (the building is marked in red)

турбулентности вне пристеночных областей. Данный параметр будет особенно сильно влиять на степень разрешения спектров аэродинамических сил, поскольку колебательный характер ветрового воздействия будет напрямую зависеть от степени разрешения кинетической энергии турбулентности. Определение величины разрешения спектра турбулентных пульсаций возможно следующим способом:

$$E(k) \% = \frac{\overline{k_{\text{раз}}}}{\overline{k_{\text{общ}}}} \cdot 100 \% = \frac{\overline{k_{\text{раз}}}}{\overline{k_{\text{раз}}} + \overline{k_{\text{SGS}}}} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где $\overline{k_{\text{раз}}}$ — разрешенная кинетическая энергия турбулентности, осредненная за характерный промежу-

ток времени, определяемый как $\overline{k_{\text{раз}}} = \frac{1}{2} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'_i(t) \times u'_i(t) dt = \frac{1}{2} (u_{i, \text{RMSE}}^2)$, $u'_i(t)$ — пульсационная i -я компонента скорости; k_{SGS} — подсеточная турбулентная кинетическая энергия, k_{SGS} будет определяться как $k_{\text{SGS}} = \left(\frac{v_{\text{SGS}}}{C_k \Delta} \right)^2$; v_{SGS} — вихревая вязкость, определяемая по подсеточно-масштабной модели WALE; C_k — константа модели; Δ — размер конечного объема ячейки.

Разрешение спектра турбулентных пульсаций является изменяемым во времени параметром, поэтому для его оценки необходимо осреднение за характерный промежуток времени. В данном случае в качестве характерного промежутка времени принят $T = 5/f$ характерного периода колебательного процесса, связанный с частотой срыва вихрей f для башни «Эволюция», взятого со спектров аэродинамических сил.

В анализе нестационарных сигналов один из важных параметров — распределение мощности сигнала по частотам. Она показывает, сколько мощности содержится в сигнальных компонентах на каждой частоте, позволяя понять, какие частоты доминируют в сигнале. В аэродинамических процессах это играет роль определения доминирующих частот, приводящих к резонансным эффектам. Вычисление спектральной плотности мощности (СПМ) аэродинамических сил и моментов или величин функций отклика системы (параметров НДС) производится следующим образом:

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F(t) e^{-i2\pi f t} dt \right|^2, \quad (17)$$

где $S(f)$ (или S_p) — спектральная плотность мощности на частоте f ; T — общее время наблюдения (физическое время моделирования); $F(t)$ — временной сиг-

нал аэродинамической силы (или функций отклика системы, таких как перемещение, скорости, ускорения, внутренние усилия и т.д.).

Обычно аэродинамические спектры рисуют в безразмерном виде: $f \cdot S_f / \sigma_f^2$, где σ_f^2 — квадрат стандартного отклонения (дисперсия), которая нужна для безразмеривания СПМ. Определять спектральную плотность мощности S_f следует с вычтенным средним значением (центрирование).

Определение оптимального временного шага обычно осуществляется на основе двух методологических подходов:

1. Первый подход основывается на необходимости захвата достаточного количества точек во временной дискретизации для высокочастотных колебаний. Например, для корректного моделирования откликов аэродинамических сил может потребоваться не менее 10–20 временных шагов на период максимальной частоты возбуждения. Часто в этих случаях также используют безразмерный параметр Струхала, который характеризует частоту образования и срыва вихрей и может служить для оценки резонансных эффектов. Данный подход можно применять для оценочных расчетов наиболее энергоемкой части спектра пульсаций, однако для более детального расчетного анализа и учета высокочастотной составляющей спектра этот принцип назначения шага по времени оказывается некорректным.

2. Второй подход основан на выполнении критерия устойчивости численного решения Куранта – Фридрихса – Леви (CFL). Для явных численных схем интегрирования этот критерий строго ограничивает выбор временного шага, в то время как для неявных схем могут допускаться более высокие значения числа CFL. Однако для разрешения спектра пульсаций будет недостаточно использования неявной схемы интегрирования с более высоким значением CFL. Для гибридного RANS-LES подхода следует обеспечить $CFL < 1$ в области LES-уравнений и $CFL < 5$ в области RANS-уравнений. В настоящей работе для назначения временного шага моделирования был использован именно данный подход, шаг по времени составляет 0,05 с.

Общее время моделирования определяется исходя из длительности распространения волнового фронта через всю расчетную область, а также дополнительного времени, необходимого для достижения устойчивого режима течения, и составило 200 с. На входе (Inlet): $\frac{dp}{dn} = 0$, $u_\tau = 0$, $u_n = U(z) = U_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha$, где $U_{10} = \sqrt{2\gamma k_{10} w_0 / \rho_{air}}$ — средняя скорость на высоте 10 м; k_{10} , α — коэффициенты типов местности (табл. 11.3 в СП 20). В данном расчете рассматривается первый ветровой район типа местности C, согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Численная схема: связанный алгоритм (Coupled algorithm), решатель: Pressure-Based, временная аппроксимация: Bounded Second Order Implicit.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Далее представлены результаты CFD-моделирования для комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити».

На рис. 13 приведены результаты CFD-моделирования для угла атаки 225° , на которых показаны изоповерхности завихренности (трехмерные поверхности, на которых значение завихренности ($\vec{\omega} \equiv \text{rot}(\vec{u}) \equiv \vec{\nabla} \cdot \vec{u}$) остается постоянным) с отображением на них кинетической энергии турбулентности (обозначаемой как TKE (Turbulence Kinetic Energy) или k) для физического времени моделирования $t = 50,1$ с, $\text{м}^2/\text{с}^2$. Данные результаты интересны с точки зрения выявления областей с высокой турбулентностью. Эти зоны могут указывать на места, где происходят интенсивные перемешивания или где конструкция подвергается повышенным динамическим (пульсационным) воздействиям, а также для понимания взаимодействия потока с объектами. В контексте высотных зданий это помогает оценить, как ветровые потоки обтекают сооружение и где возникают значимые турбулентные эффекты.

На рис. 14 показаны линии тока для угла атаки 225° при физическом времени моделирования $t = 200$ с. Данные линии являются семейством кривых, касательные векторы которых составляют векторное поле скорости потока. Они показывают направление, в котором будет перемещаться безмассовый элемент жидкости или газа в любой момент времени, и определяются как:

$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z}.$$

На рис. 15 представлено сечение конечно-объемной сетки на высоте 120 м с изополями функции переключателя f_s (моделирование вихрей со смешанным напряжением) для физического времени моделирования $t = 200$ с при угле атаки ветра 0° , где значения на изополях 0 — это области, в которых поток разрешается моделью турбулентности LES, а 1 — это области, в которых поток моделируется RANS-моделями турбулентности (см. уравнение (13)). Данный параметр показывает области, где будет непосредственно разрешен спектр турбулентных пульсаций.

На рис. 16 показаны изополя чисел Куранта для физического времени $t = 200$ с при угле атаки 0° . В вычислительной гидродинамике (CFD) при решении нестационарных (зависящих от времени) задач крайне важно анализировать распределение чисел Куранта по расчетной области. CFL — это безразмерный параметр, определяемый как $CFL = u\Delta t/\Delta x$, где u — локальная скорость потока в данной точке; Δt — шаг по времени; Δx — размер конечно-объемной сетки в пространстве.

На рис. 17 представлены изополя скорости и статического давления потока на высоте 120 м для физического времени моделирования $t = 200$ с при угле атаки ветра 0° .

На рис. 18 показаны изополя разрешенного спектра турбулентных пульсаций на высоте 120 м для угла

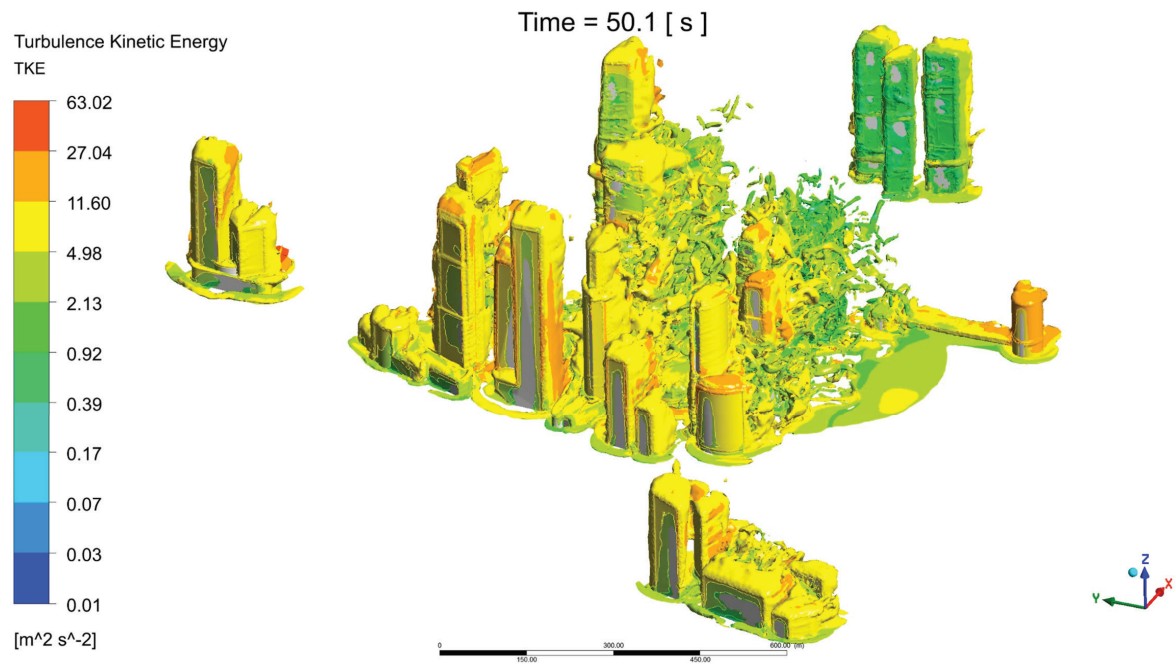


Рис. 13. Результаты CFD-моделирования (угол атаки 225°). Изоповерхности кинетической энергии турбулентности (ТКЕ) для физического времени моделирования $t = 50,1$ с, $\text{м}^2/\text{с}^2$

Fig. 13. CFD modelling results (angle of attack 225°). Turbulence kinetic energy (TKE) isosurfaces for physical simulation time $t = 50.1$ s, m^2/s^2

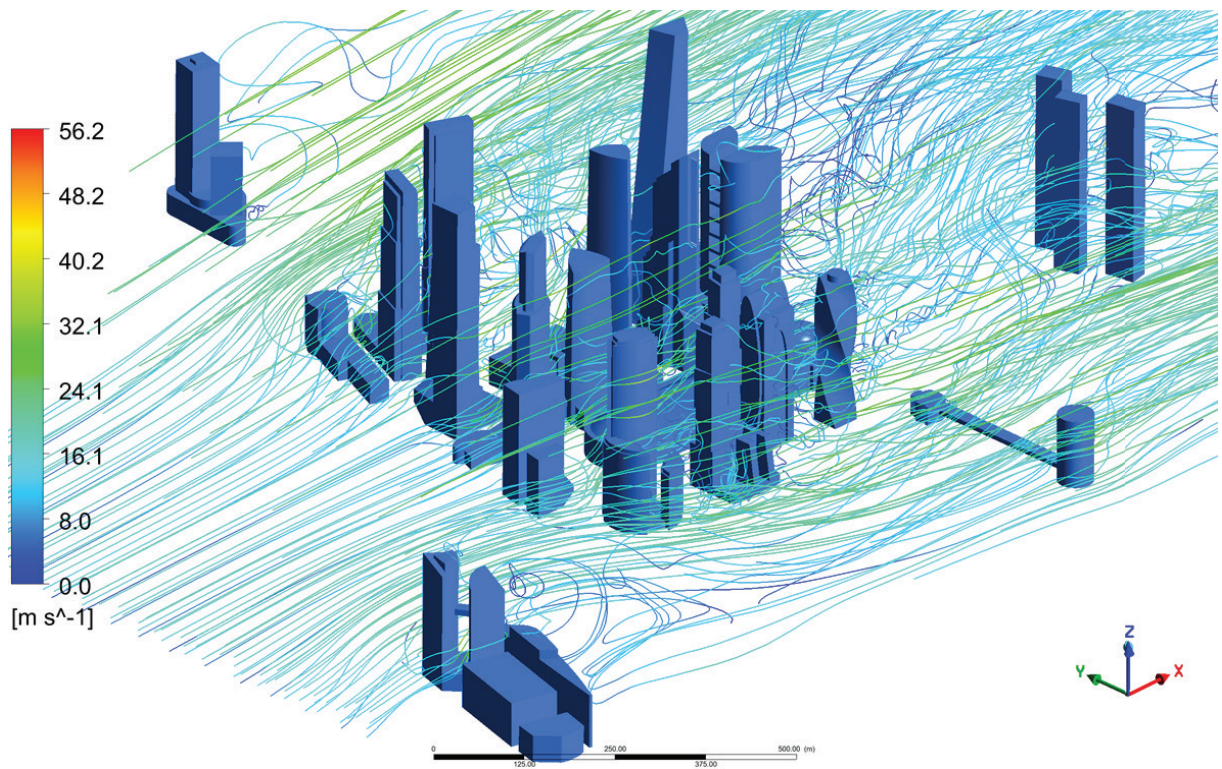


Рис. 14. Линии тока для угла атаки 225° при физическом времени моделирования $t = 200$ с комплекса ММДЦ «Москва-Сити», м/с

Fig. 14. Streamlines for the angle of attack 225° at physical modelling time $t = 200$ s of the MIBC “Moscow City”, m/s

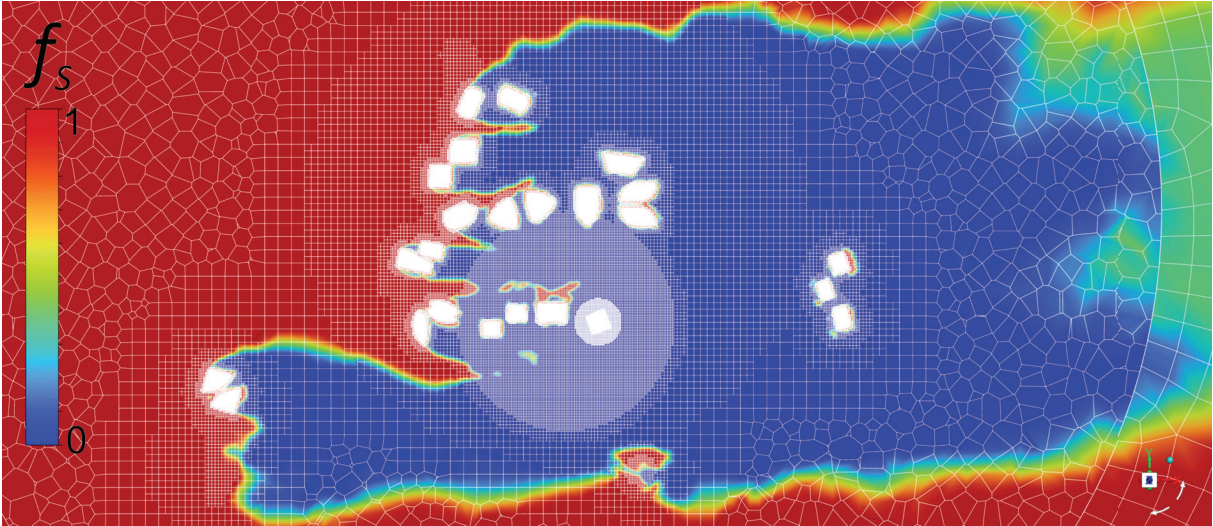


Рис. 15. Изополя функции переключателя f_s (моделирование вихрей со смешанным напряжением) на высоте 120 м для физического времени моделирования $t = 200$ с, где 0 — это области, в которых поток разрешается моделью турбулентности LES, а 1 — это области, в которых поток моделируется RANS-моделями турбулентности

Fig. 15. Isofield of the switch function f_s (mixed-stress eddy simulation) at 120 m altitude for physical simulation time $t = 200$ s, where 0 are regions where the flow is resolved by the LES turbulence model and 1 are regions where the flow is simulated by RANS turbulence models

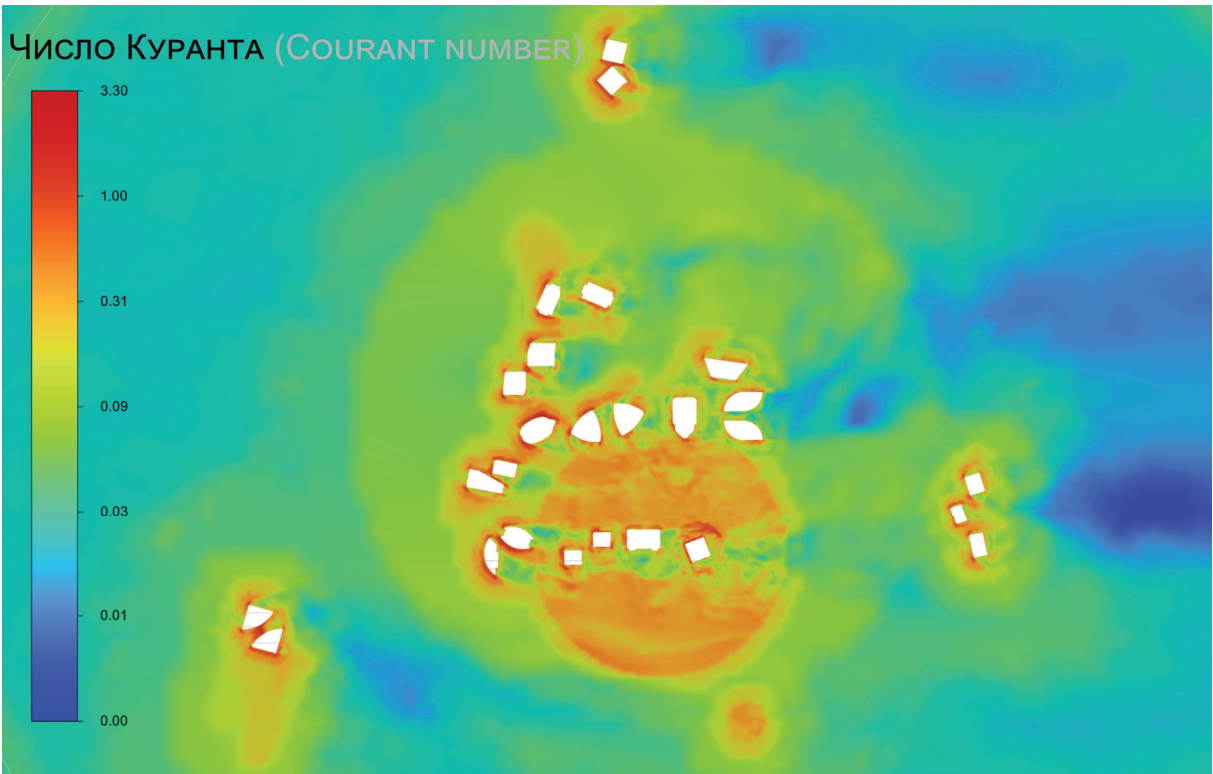


Рис. 16. Изополя чисел Куранта на высоте 120 м для физического времени моделирования $t = 200$ с

Fig. 16. Isofield of Courant numbers at a height of 120 m for physical simulation time $t = 200$ s

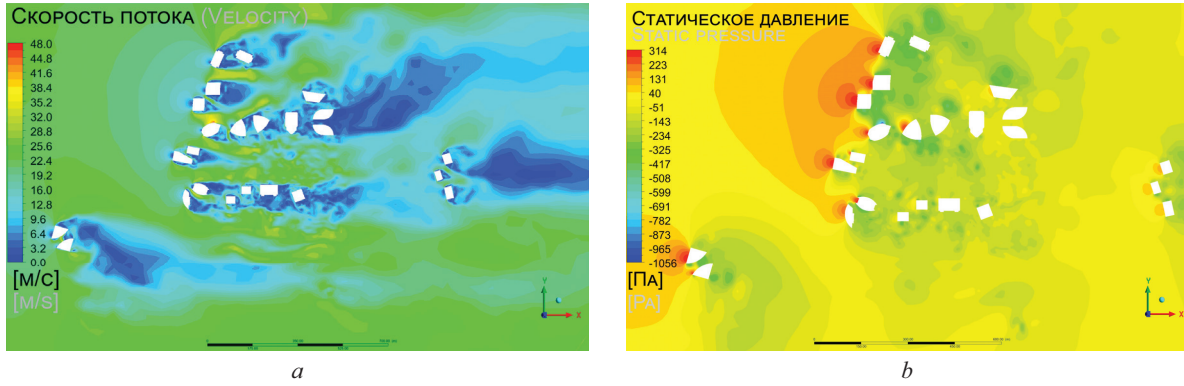


Рис. 17. Изополя скорости потока (a) и статического давления (b) на высоте 120 м, м/с

Fig. 17. Isofield of flow velocity (a) and static pressure (b) at 120 m height, m/s

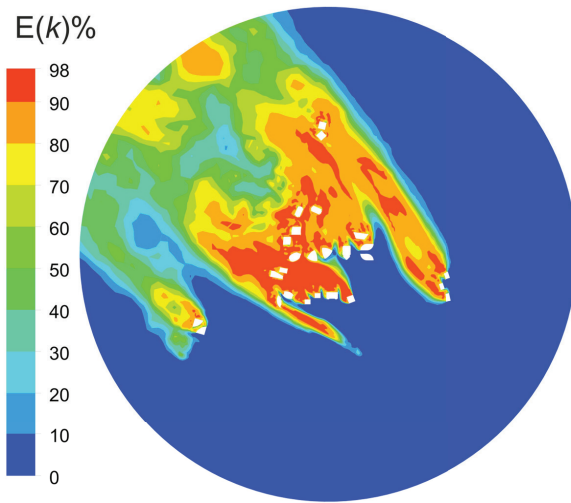


Рис. 18. Изополя разрешенного спектра турбулентных пульсаций на высоте 120 м, %

Fig. 18. Isofield of the resolved spectrum of turbulent pulsations at a height of 120 m, %

атаки ветра 0° . Этот параметр определяется согласно уравнению (16). В функционале ANSYS Fluent есть возможность проводить выборку данных для временной статистики. С помощью данного функционала вычисление разрешенного спектра турбулентных пульсаций выполнялось следующим образом:

$$E(k) \% = \frac{\frac{1}{2} \text{RMSE}(u_i)^2}{\text{mean}(TKE) + \frac{1}{2} \text{RMSE}(u_i)^2} \cdot 100 \%$$

В результате CFD-моделирования башни «Эволюция», являющейся частью ММДЦ «Москва-Сити», были рассчитаны суммарные поэтажные силы, которые в дальнейшем будут применены как вектор внешних нагрузок в механической модели в уравнениях (1), (2) и (5). Рассмотрено 8 углов атаки ветра (с шагом 45°), схема которых приведена на рис. 12. В статье далее приведены результаты для 3 характер-

ных углов атаки ветра: 0° , 45° и 225° . Физическое время моделирования составляло 200 с, однако для численного моделирования динамического отклика были взяты последние 150 с времени, так как первые 50 с отброшены из-за периода стабилизации потока при CFD-моделировании. Схема приложения нагрузок на конечно-элементную модель башни «Эволюция» представляла собой следующий порядок:

- для задачи прямой динамики на первых итерациях отключались силы инерции для приложения собственного веса и полезной нагрузки во избежание осцилляций, вызванных приложением нагрузки за малый промежуток времени;
- далее обнулялись первые числовые значения векторов внешних нагрузок F_x , F_y и M_z , чтобы избежать эффекта мгновенного приложения ветровой нагрузки, включались силы инерции и запускался прямой динамический расчет.

Представлены аэродинамические силы на башню «Эволюция», полученные с учетом аэродинамической интерференции с окружающей застройкой.

На графиках (рис. 19–22) видно, что аэродинамические силы сильно зависят от угла атаки ветра. Особенно заметно, что разные углы атаки приводят к значительным колебаниям значений, что указывает на изменчивость ветрового давления в зависимости от направления. Например, при углах 0° и 90° колебания силы имеют разную амплитуду, что говорит о сложном взаимодействии ветра с геометрией башни, а также окружающей застройкой. Значение крутящего момента также меняется в зависимости от угла атаки ветра. На графиках видна значительная разница в амплитуде моментов для разных углов атаки, что указывает на то, что башня испытывает значительные крутильные колебания при определенных углах ветра, вызванных особенностью ее формы, а также сложным распределением ветровых потоков, вызванных аэродинамической интерференцией с окружающими зданиями. Стоит обратить внимание на то, что величины аэродинамических сил, перпендикулярных к ветровому фронту, имеют тот же порядок величин, что и силы вдоль направления ветра, что свидетельствует о возникновении

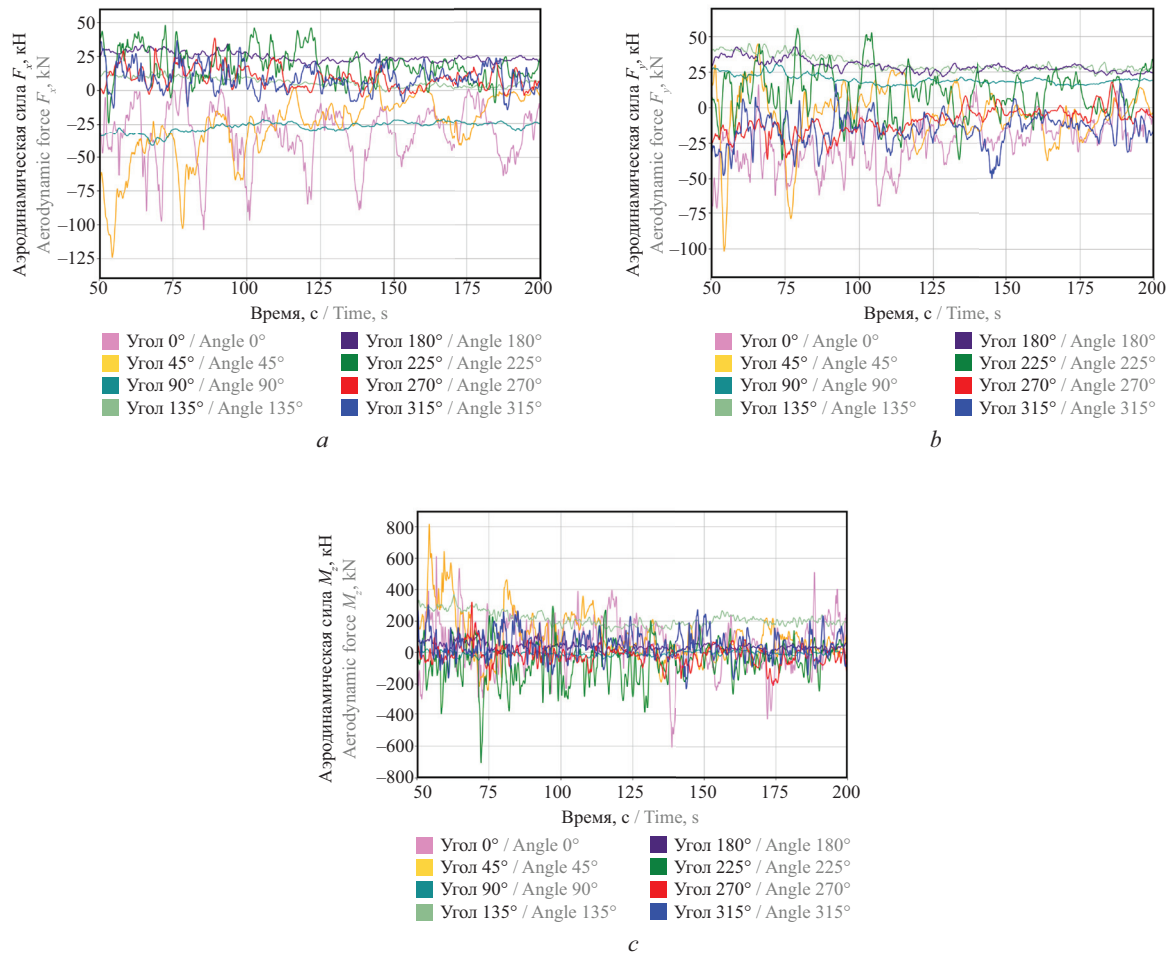
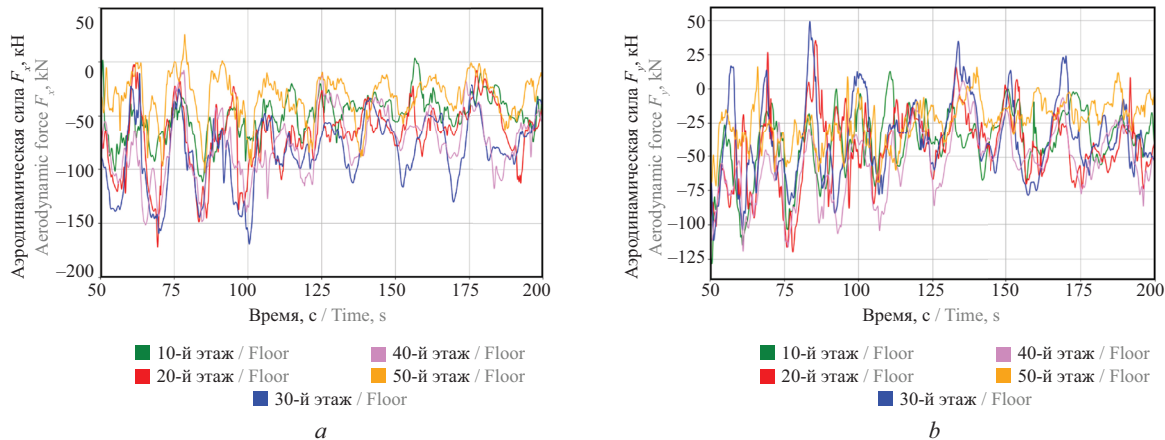


Рис. 19. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для 50-го этажа башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра

Fig. 19. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for the 50th floor of the "Evolution" tower at different wind attack angles

у высотных зданий колебаний в направлении, перпендикулярном направлению ветра. В отечественных нормативных документах аэродинамические силы поперек ветрового потока, а также аэродинамические крутящие моменты не учитываются.

Окружающая застройка создает сложное турбулентное течение с характерными турбулентными пульсациями, характеризующееся наличием разных пространственных масштабов. Важнейшей характеристикой турбулентности является распределение интенсивности энергии течения между составляю-



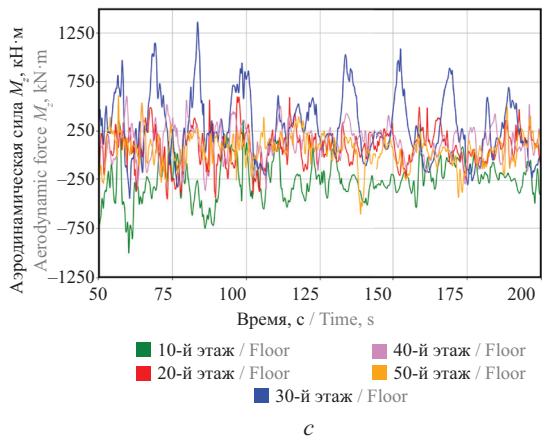


Рис. 20. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для угла атаки 0° для разных этажей башни «Эволюция»

Fig. 20. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for angle of attack 0° for different floors of the “Evolution” tower

щими частотного диапазона. Для количественного анализа энергии турбулентных течений используется спектральное разложение процесса при помощи пре-

образований Фурье, определяющее спектральную плотность мощности изучаемого процесса. По полученным графикам зависимости аэродинамических сил

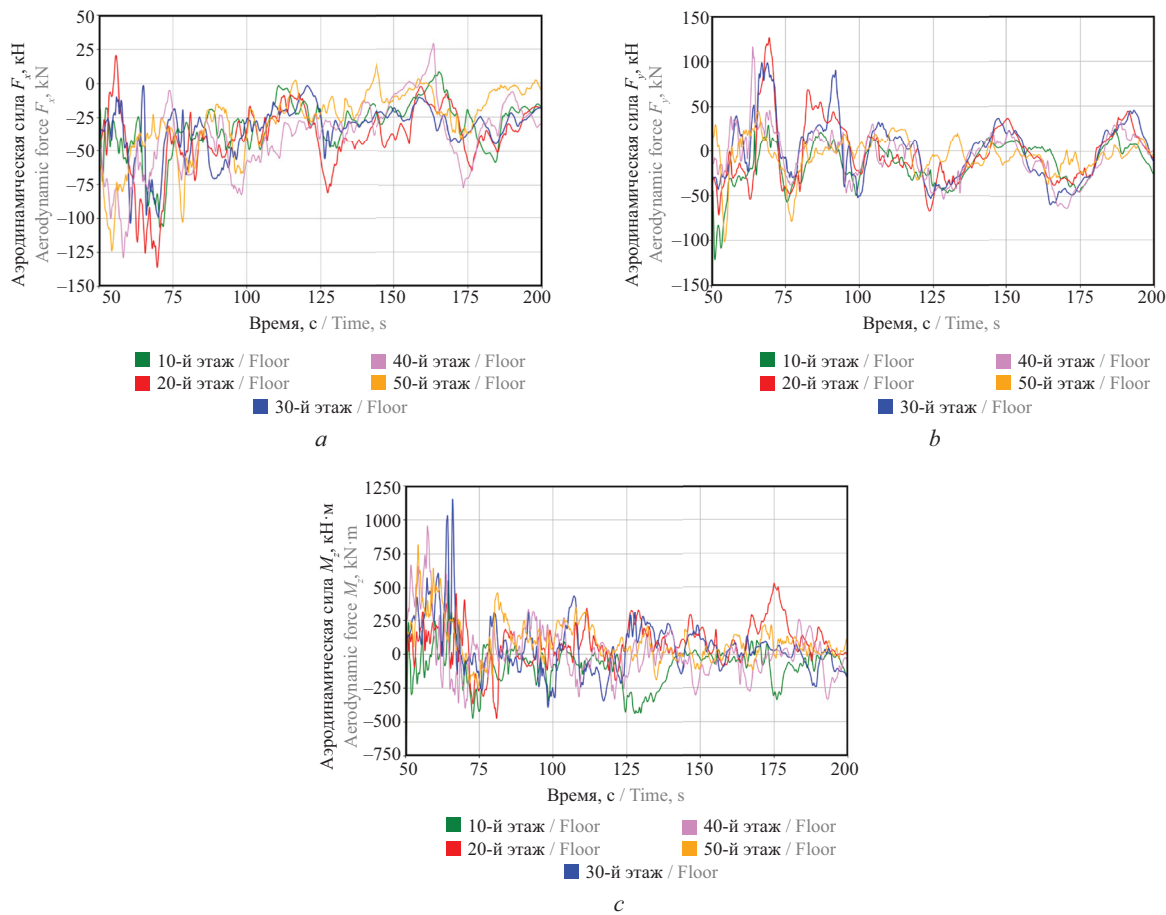


Рис. 21. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для угла атаки 45° для разных этажей башни «Эволюция»

Fig. 21. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for angle of attack 45° for different floors of the “Evolution” tower

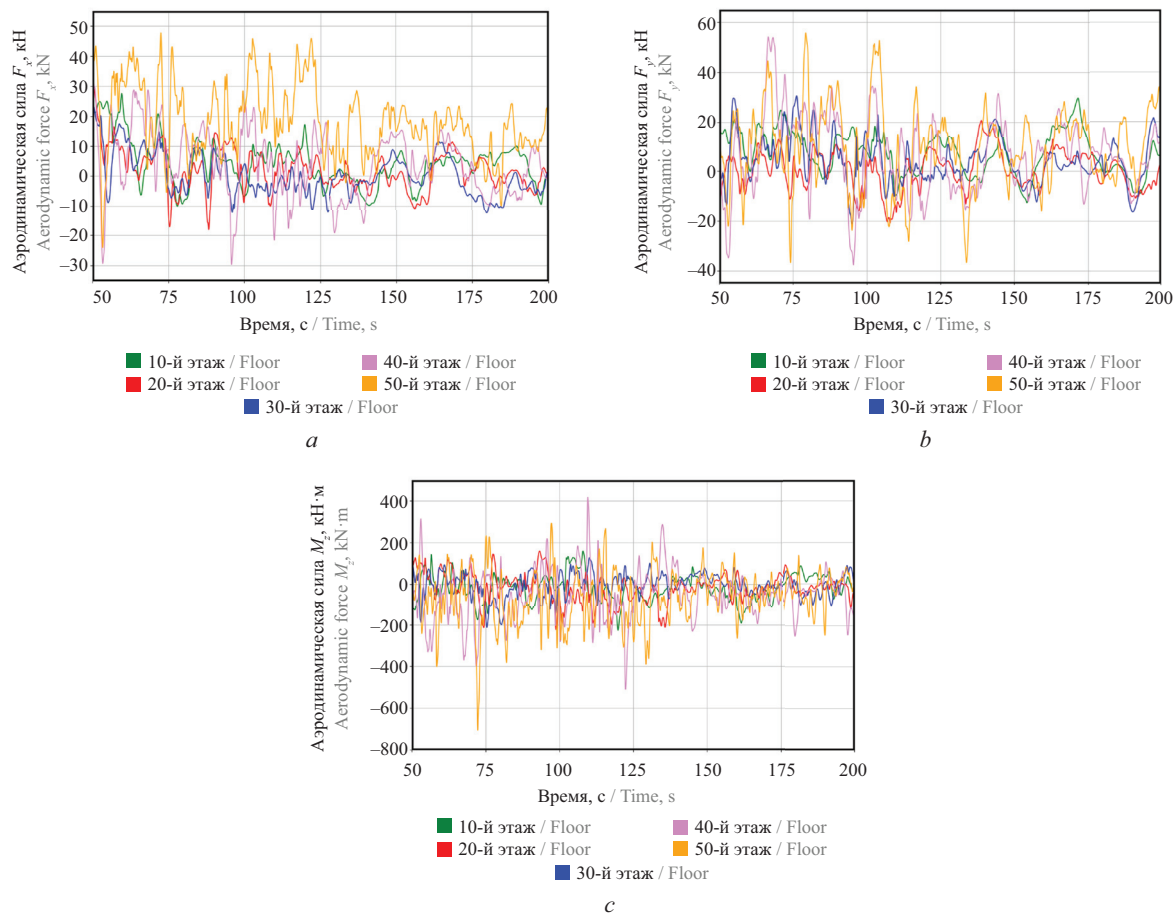
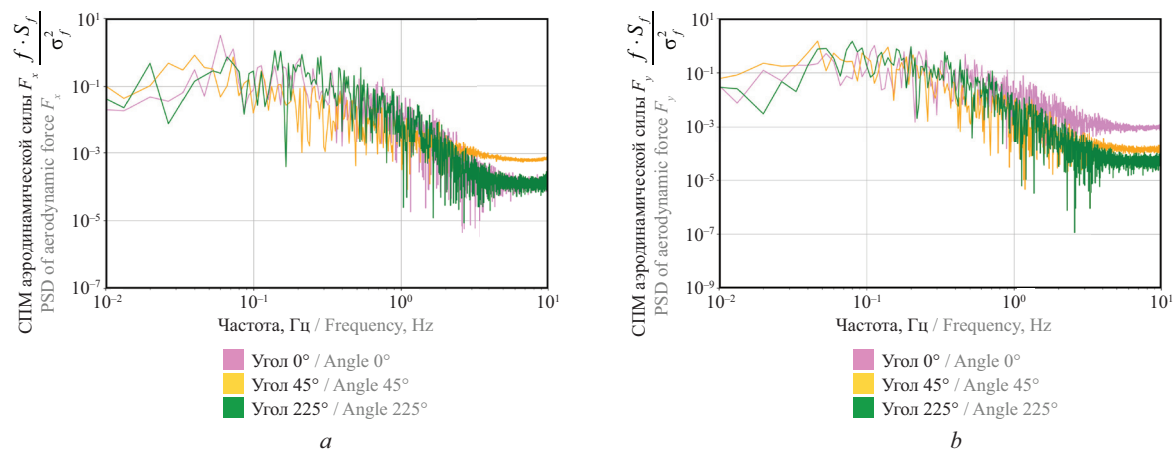


Рис. 22. Графики зависимости аэродинамических сил F_x (a); F_y (b) и моментов M_z (c) от времени для угла атаки 225° для разных этажей башни «Эволюция»

Fig. 22. Plots of aerodynamic forces F_x (a); F_y (b) and moments M_z (c) from time for angle of attack 225° for different floors of the “Evolution” tower

во времени были получены спектральные характеристики ветрового воздействия. Это важно для определения того, какие частоты вносят наибольший вклад в динамическое воздействие на здание. Знание спектра позволяет выявить частоты, на которых может возникнуть резонанс между ветровыми воздействиями и собственными частотами колебаний конструкций.

Анализ графиков спектральной плотности мощности аэродинамических сил для 50-го этажа башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра (рис. 23) показывает, что основная часть энергии сосредоточена в низкочастотной области. Это указывает на то, что воздействие ветра имеет значительный вклад в низкочастотные колебания здания, являющиеся



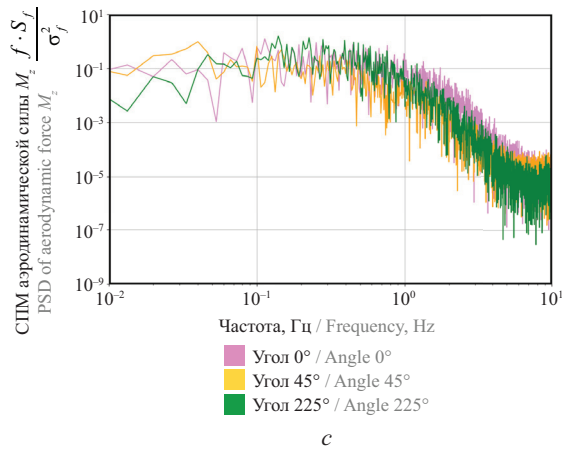
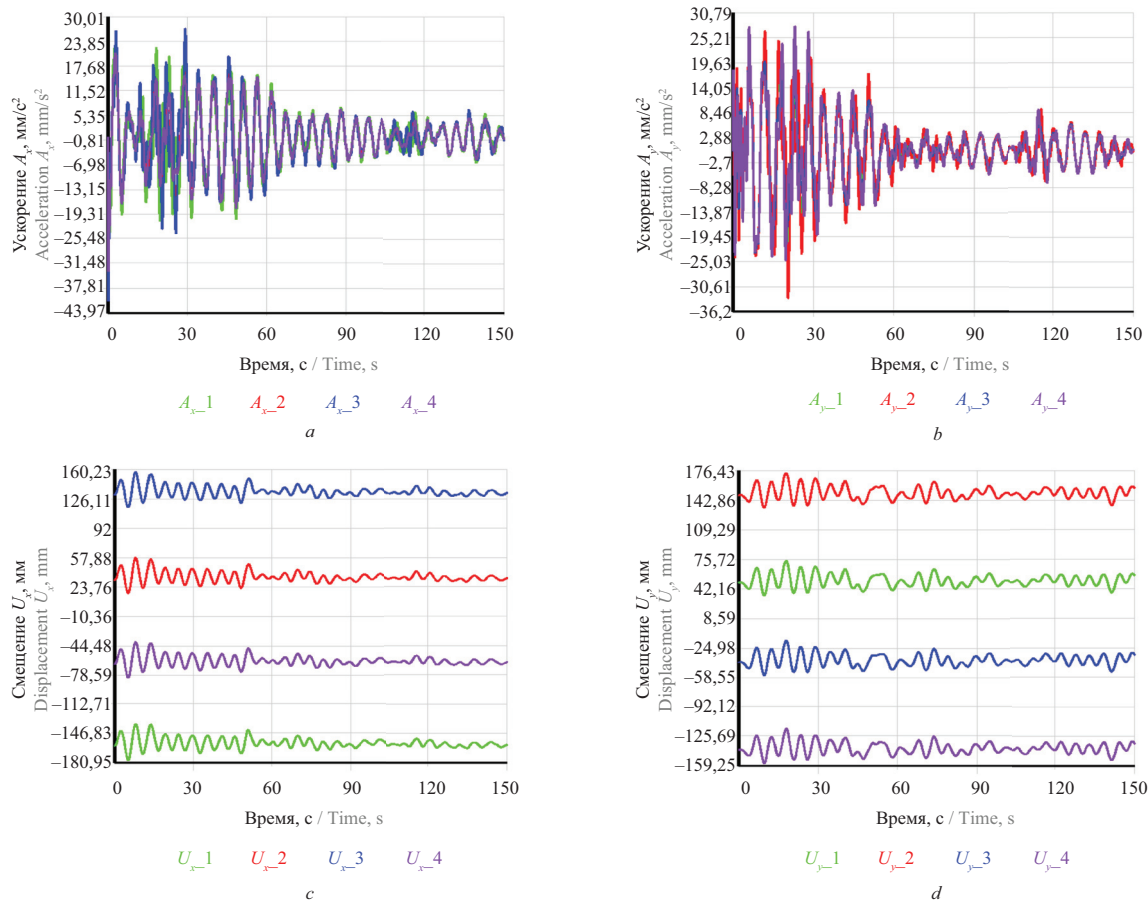


Рис. 23. Графики спектральной плотности мощности аэродинамических сил для 50-го этажа башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра

Fig. 23. Aerodynamic forces power spectral density plots for the 50th floor of the “Evolution” tower at different wind angles of attack

общесистемными частотами и формами колебаний высотных зданий, что особенно важно для оценки динамических характеристик. При увеличении частоты происходит быстрое уменьшение мощности, что говорит о том, что высокочастотные компоненты практически незначительны для динамики ветрового воздействия на несущие конструкции. Это может означать, что здание меньше подвержено кратковре-

менным и резким воздействиям, однако низкочастотные колебания могут привести к длительным отклонениям конструкции (по низшим формам колебаний). Ниже приведены результаты конечно-элементного моделирования динамического отклика башни «Эволюция» при разных углах атаки ветра (рис. 24–26). Для углов атаки 0, 45 и 225° представлены более расширенные результаты.



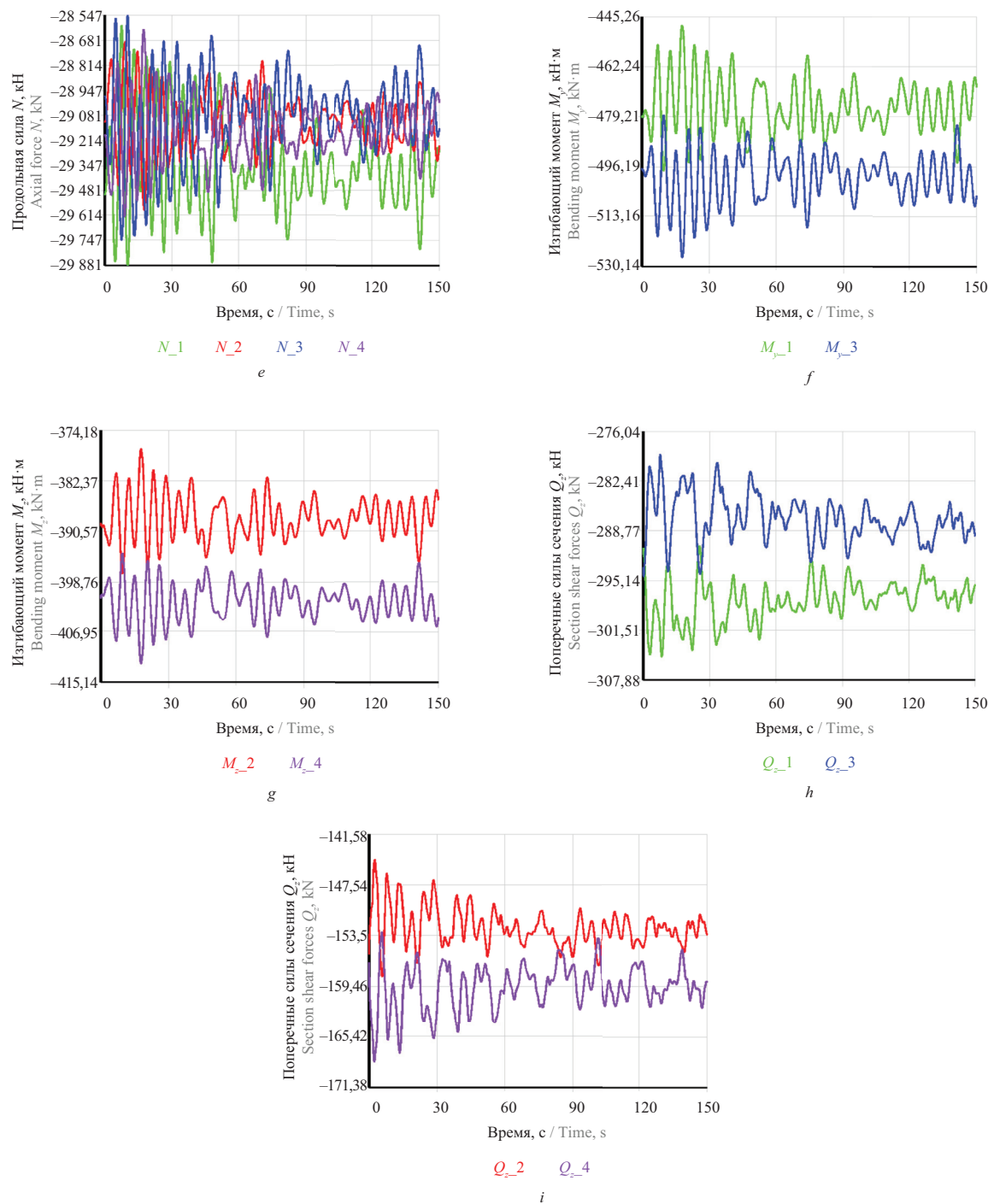


Рис. 24. Результаты прямого динамического анализа башни «Эволюция» на нестационарные ветровые воздействия для угла атаки ветра 45°

Fig. 24. Results of direct dynamic analysis of the “Evolution” tower for transient wind effects for a wind attack angle of 45°

Для большей информативности результаты приведены в виде круговых (лепестковых) диаграмм (рис. 27). На основе круговой диаграммы можно отметить, что аэродинамическая интерференция значительно влияет на динамический отклик, причем анализ показывает, что не всегда эффекты экранирования потока приводят к защите зданий от ветровых воздействий. Для скоростей и ускорений средние ве-

личины равны 0 и не приведены на круговых (лепестковых) диаграммах.

Далее приведен спектр реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия, который представляет собой СПМ для ускорений (рис. 28, а, б) и перемещений (рис. 28, с, д) (по осям X и Y) при различных характерных углах атаки ветра (0, 45 и 225°), а также продольного усилия колонны № 1 (рис. 28, е). Влияние

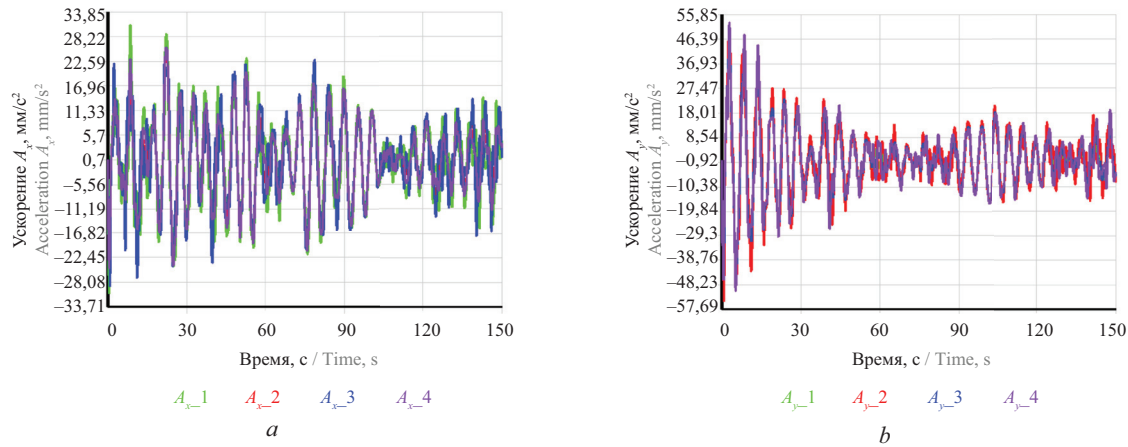


Рис. 25. Ускорение верхнего этажа башни «Эволюция» при ветровых воздействиях при угле атаки ветра 0°

Fig. 25. Acceleration of the top floor of the “Evolution” tower under wind effects at a wind attack angle of 0°

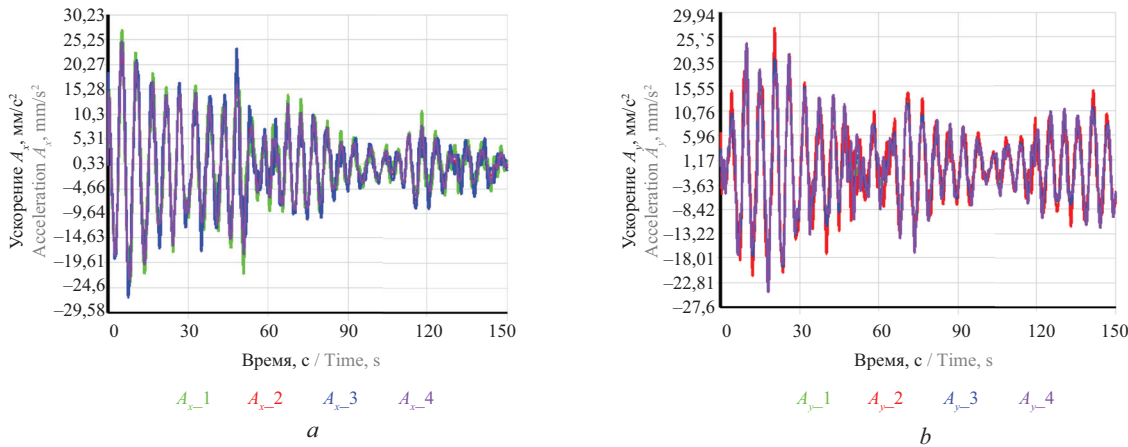
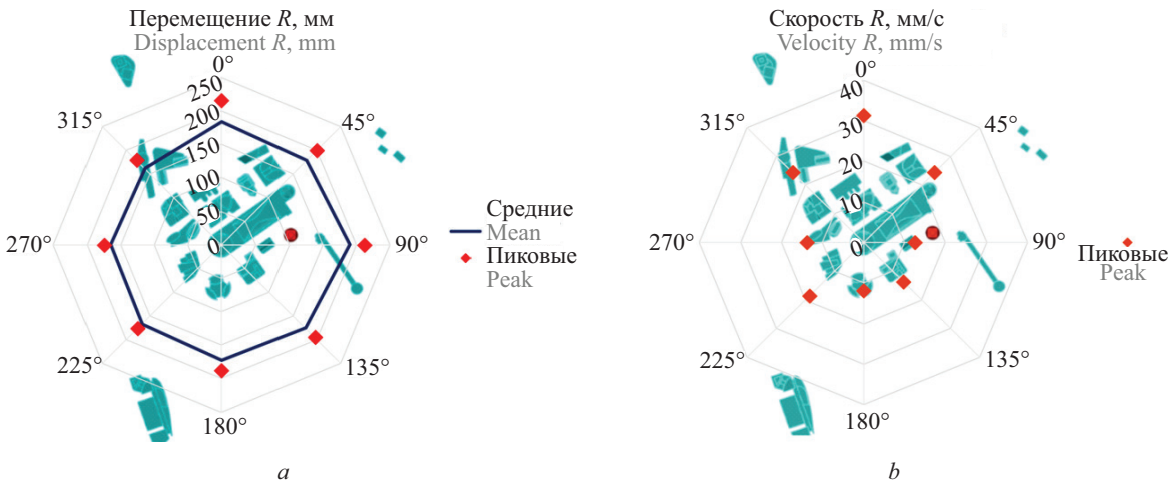


Рис. 26. Ускорение верхнего этажа башни «Эволюция» при ветровых воздействиях при угле атаки ветра 225°

Fig. 26. Acceleration of the top floor of the “Evolution” tower under wind effects at a wind attack angle of 225°

угла атаки ветра на спектр реакции башни «Эволюция» заметно на всех графиках. При разных углах наблюдаются различные пики в спектральных плотностях, что свидетельствует о зависимости динамической ре-

акции башни от направления ветрового воздействия. Например, на угле 45° пик в ускорениях и перемещениях отмечается в диапазоне низких частот. На всех графиках можно выделить диапазон частот от 0,1 до 1 Гц,



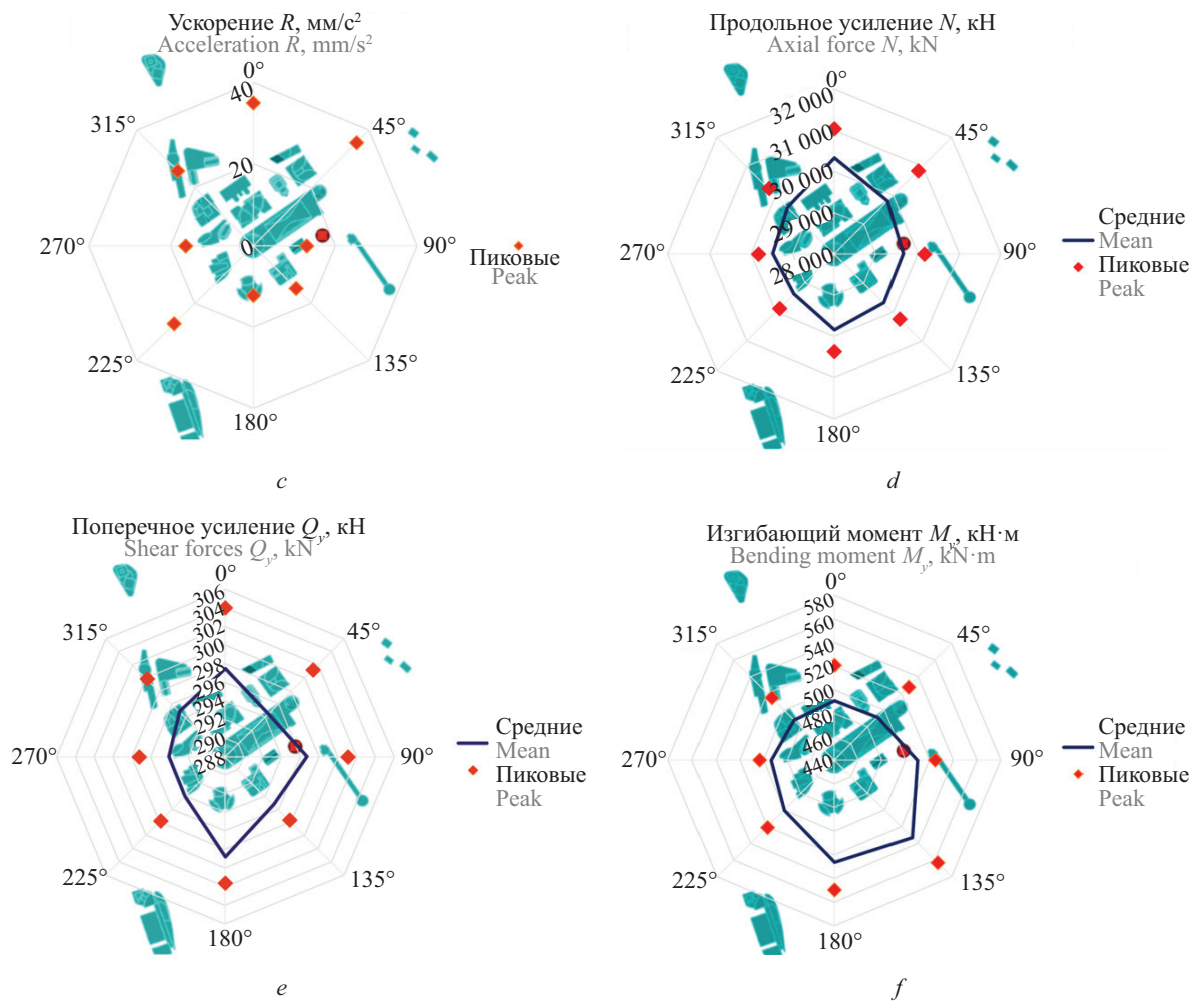
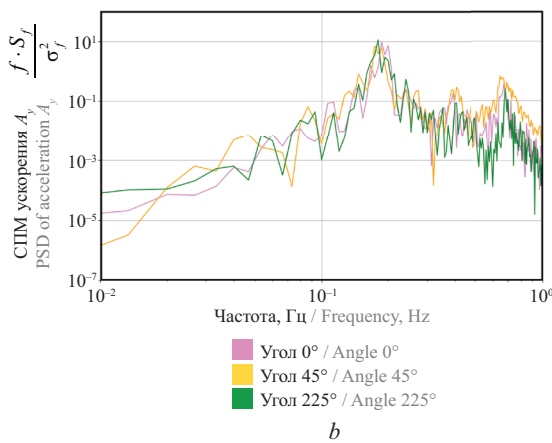
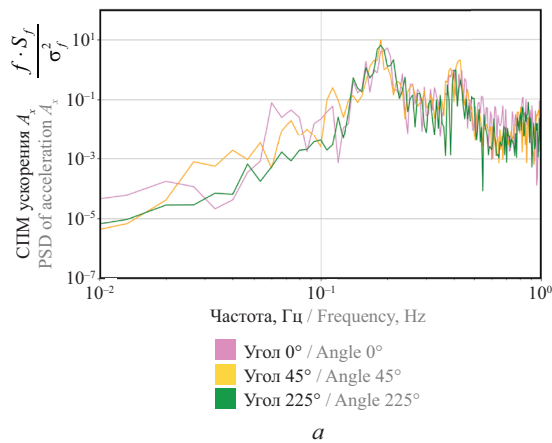


Рис. 27. Круговые (лепестковые) диаграммы динамической реакции башни «Эволюция» для разных углов атаки ветра
Fig. 27. Circle (petal) diagrams of the dynamic response of the “Evolution” tower for different wind attack angles

в котором сосредоточены основные пики (наиболее энергоемкий спектр реакций). В этом же диапазоне включены основные собственные частоты колебаний башни, которые усиливаются под воздействием ветра. Особенно заметны пики вблизи первой собственной частоты колебаний, указывающие на возможные резонансные эффекты. Начиная с определенных частот,

СПМ постепенно уменьшается, что характерно для затухающих колебаний в аэродинамической среде, где высокочастотные компоненты энергии ветра передаются менее эффективно.

Приведение огибающих (со всех углов атаки ветра) величин (табл. 2) позволяет выявить максимальные значения реакций конструкции (перемеще-



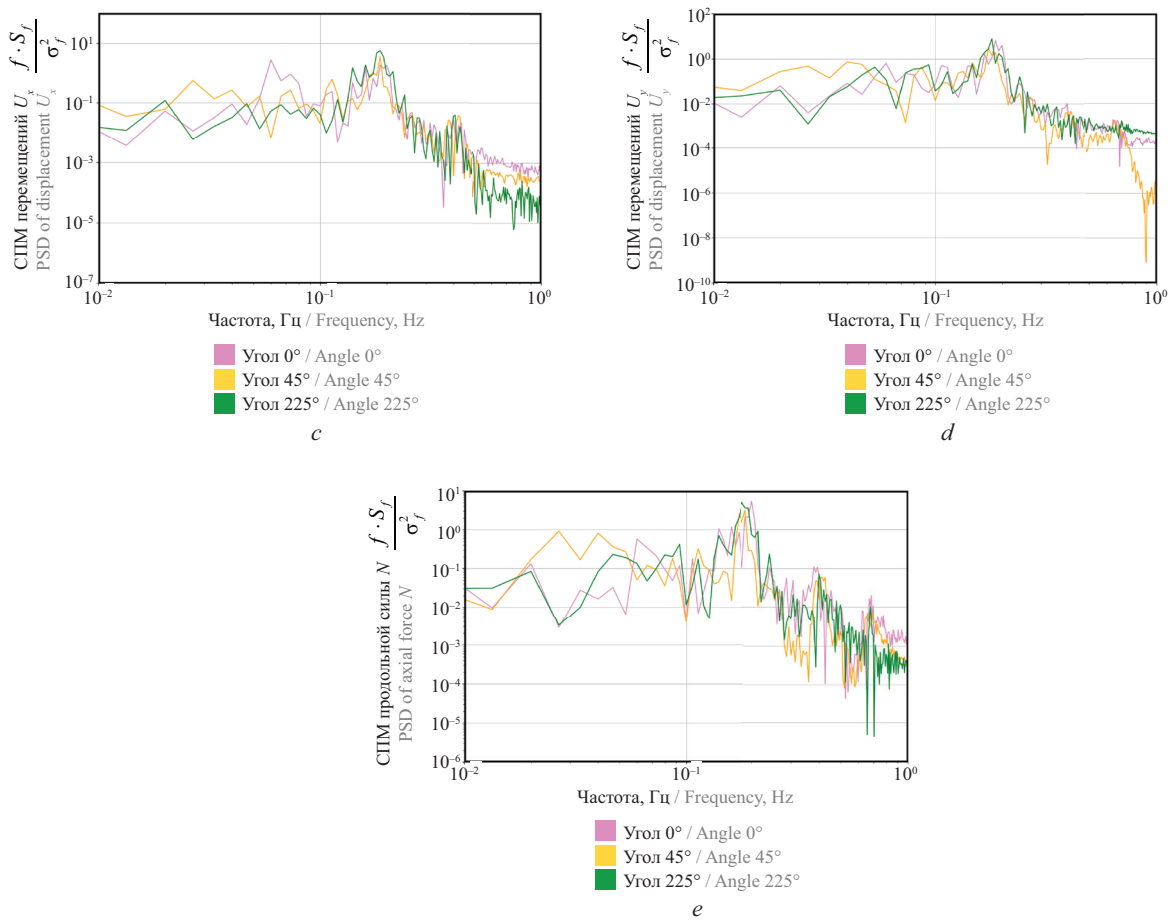


Рис. 28. Спектральная плотность мощности динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия
Fig. 28. Power spectral density of the dynamic response of the “Evolution” tower to wind loads

Табл. 2. Табличные результаты огибающей (со всех углов атаки ветра) динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия

Table 2. Tabular results of the envelope (from all angles of wind attack) dynamic response of the “Evolution” tower to wind loads

Результат / Result		Точка/колонна 1 Point/column 1	Точка/колонна 2 Point/column 2	Точка/колонна 3 Point/column 3	Точка/колонна 4 Point/column 4
Перемещение R, мм Displacement R, mm	Среднее Mean	183,7	175,8	144,2	176,0
	Пик Peak	215,2	195,1	162,7	194,4
Скорость R, мм/с Velocity R, mm/s	Пик Peak	31,4	30,2	29,0	29,8
Ускорение R, мм/с ² Acceleration R, mm/s ²	Пик Peak	34,9	35,7	34,3	33,6
Продольное усилие N, кН Axial force N, kN	Среднее Mean	30 313,0	29 664,7	29 840,1	29 428,8
	Пик Peak	31 043,3	30 162,9	30 375,4	29 879,6
Поперечное усилие Q _z , кН Shear force Q _z , kN	Среднее Mean	56,8	170,2	55,7	166,6
	Пик Peak	62,5	174,7	60,8	173,4

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Результат / Result		Точка/колонна 1 Point/column 1	Точка/колонна 2 Point/column 2	Точка/колонна 3 Point/column 3	Точка/колонна 4 Point/column 4
Поперечное усилие Q_y , кН Shear force Q_y , kN	Среднее Mean	297,4	162,1	298,8	159,4
	Пик Peak	304,1	166,6	301,6	165,7
Момент M_y , кН·м Bending moment M_y , kN·m	Среднее Mean	484,8	164,0	533,0	166,6
	Пик Peak	516,5	169,6	562,9	173,4
Момент M_z , кН·м Bending moment M_z , kN·m	Среднее Mean	662,1	393,5	640,3	409,2
	Пик Peak	677,5	403,3	645,1	416,7

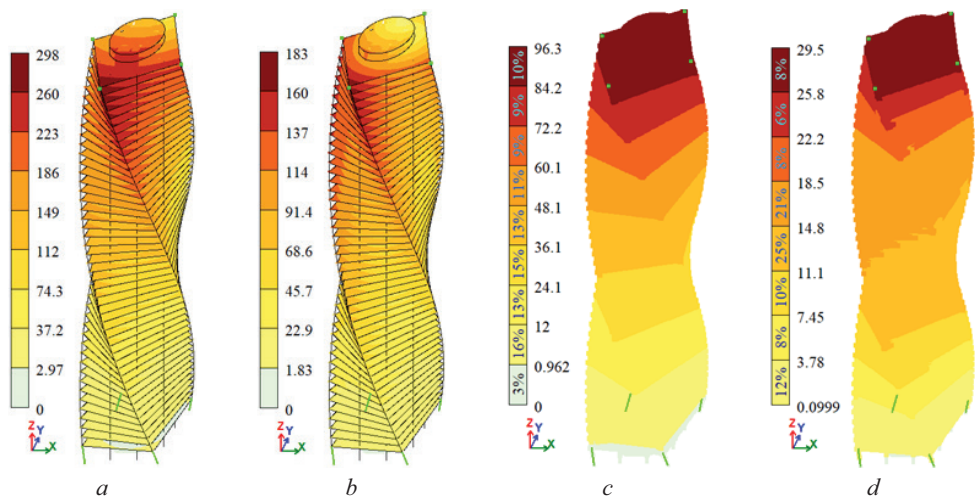


Рис. 29. Результаты динамического отклика башни «Эволюция»: *a, c* — перемещение и ускорение на среднюю и пульсационную составляющую ветра по СП 20.13330.2016; *b, d* — перемещение и ускорение на численно моделируемую среднюю и расчет пульсационной составляющей реакции согласно СП 20.13330.2016

Fig. 29. Results of the dynamic response of the “Evolution” tower: *a, c* — displacement and acceleration for the mean and gust component of wind according to CP 20.13330.2016; *b, d* — displacement and acceleration for numerically modeled mean and calculated gust component of response according to CP 20.13330.2016

Табл. 3. Табличные результаты для угла атаки ветра 225° динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия

Table 3. Tabulated results for the wind angle of attack 225° of the dynamic response of the “Evolution” tower to wind load

Точка 3/колонна 3 Point 3/column 3 Результат Result		Предложен- ная методика Proposed methodology	Ли́ра-САПР (расчет по СП) Lira-SAPR (CP calculation)	Ли́ра-САПР (средняя составляющая из CFD и пульсация по СП) Lira- SAPR (average component from CFD and gust factor by CP)	Δ_{1-2} , %	Δ_{1-3} , %
Перемещение R , мм Displacement R , mm	Среднее Mean	144,15	225,59	165,21	36,10	12,75
	Пик Peak	162,65	297,34	182,81	45,30	11,03
Ускорение R , мм/с ² Acceleration R , mm/s ²	Пик Peak	34,26	90,82	27,02	62,28	21,11

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Точка 3/колонна 3 Point 3/column 3 Результат Result		Предложен- ная методика Proposed methodology	Ли́ра-САПР (расчет по СП) Lira-SAPR (CP calculation)	Ли́ра-САПР (средняя составляющая из CFD и пульсация по СП) Lira- SAPR (average component from CFD and gust factor by CP)	Δ_{1-2} , %	Δ_{1-3} , %
Продольное усилие N , кН Axial force N , kN	Среднее Mean	29 072,91	31 982,30	33 489,20	9,10	13,19
	Пик Peak	29 573,70	30 494,00	33 143,70	3,02	10,77
Момент M_y , кН·м Bending moment M_y , kN·m	Среднее Mean	499,52	606,27	621,51	18,26	19,63
	Пик Peak	520,52	611,11	627,23	14,14	17,01

ния, ускорения, усилия и т.д.) при воздействии ветра из любых направлений.

В табл. 3 приведены результаты (в референсной точке № 3 и колонне № 3 (см. рис. 4)) сопоставления трех вариантов определения динамической реакции башни «Эволюция» на ветровые воздействия:

- расчет согласно предложенной методике определения динамического отклика посредством прямого динамического анализа с учетом нестационарных ветровых воздействий и разрешением спектра турбулентных пульсаций (столбец 2);
- расчет средней и пульсационной составляющей реакции здания на ветровое воздействие согласно нормативному документу СП 20.13330.2016, реализованный в ПК Ли́ра-САПР (столбец 3);
- расчет средней составляющей на численно моделируемые ветровые воздействия (в качестве осредненных ветровых нагрузок использованы результаты численного моделирования в ANSYS Fluent), расчет пульсационной составляющей реакции здания на ветровое воздействие согласно нормативному документу СП 20.13330.2016 (столбец 4).

Результаты динамического отклика представлены на рис. 29. Вычисленный динамический отклик в ПК SCAD дает аналогичные результатам Ли́ра-САПР значения и не представлен в таблице.

Предложенная методика демонстрирует более низкие значения динамического отклика по сравнению с расчетами по СП 20.13330.2016. Использование CFD-моделирования для определения средней составляющей ветрового воздействия (с пульсационной составляющей по СП 20.13330.2016) по динамической реакции (перемещение и ускорение) показывает в целом результаты, которые находятся между предложенной методикой и расчетами по СП. Значительные различия в пиковых значениях перемещений и ускорений указывают на излишнюю консервативность расчетов по СП, в то время как численное моделирование позволяет получать более оптимальные решения, основываясь на физике процессов и учете факторов, влияющих на динамический отклик, таких

как аэродинамическая интерференция, влияние формы здания и изменения спектра набегающего потока и прочее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана методика численного моделирования динамического отклика высотных зданий при ветровых воздействиях с учетом аэродинамической интерференции с окружающей застройкой и разрешением спектра турбулентных пульсаций. Методика основана на сочетании нестационарного аэродинамического CFD-моделирования и прямого динамического конечно-элементного анализа. Апробация методики проведена на примере башни «Эволюция», входящей в состав Московского международного делового центра «Москва-Сити». На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

Результаты исследования показали, что влияние окружающей застройки существенно сказывается на динамическом отклике высотных зданий при ветровых воздействиях. Эффекты аэродинамической интерференции могут приводить как к снижению ветровых нагрузок за счет экранирования, так и к их увеличению из-за усиления ветрового потока между зданиями и возникновения дополнительных турбулентных структур, вызванных срывами вихрей с близстоящих зданий. Выявлено, что при определенных направлениях ветра башня «Эволюция» испытывает более интенсивные ветровые нагрузки, что сказывается на НДС и особенно критично при учете резонансных явлений.

Анализ спектральных характеристик аэродинамических сил и моментов показал, что основная часть энергии ветрового воздействия сосредоточена в низкочастотной области, совпадающей с собственными частотами колебаний высотных зданий. Это подчеркивает необходимость точного учета низко-

частотных пульсаций ветра при проектировании высотных сооружений, так как они оказывают значительное влияние на динамический отклик и могут приводить к резонансным колебаниям. Также было отмечено, что аэродинамическая интерференция (при моделировании с разных углов атаки) может влиять на спектральный состав аэродинамических сил и моментов, что вызывает смещение энергетических пиков в частотной области при разных углах атаки ветра.

Разработаны рекомендации по выбору параметров и моделей, используемых при численном моделировании динамического отклика высотных зданий при ветровых воздействиях. Особое внимание следует уделять разрешению спектра турбулентных пульсаций и их влиянию на спектр аэродинамических сил и моментов. Применение гибридных моделей турбулентности, таких как SBES, оптимальных параметров сетки и шага по времени позволило достичь высокой степени разрешения турбулентности при моделировании турбулентных структур в условиях плотной городской застройки. Также важно использовать надежные методы прямого интегрирования уравнений движения и обоснованный подход к выбору параметров демпфирования системы для определения динамической реакции здания.

В ходе исследования построены спектры аэродинамических сил и моментов, а также спектры динамического отклика башни «Эволюция». Анализ показал, что взаимосвязь между этими спектрами сложнее, чем в подходах, реализованных в нормативных документах. Это свидетельствует о том, что существующие подходы не могут адекватно описать динамическое поведение высотных зданий под воздействием ветра.

Сравнение полученных результатов с расчетами по СП 20.13330.2016 показало, что нормативные методики являются консервативными и не учитывают сложную аэродинамику ветрового потока вокруг зданий сложной формы и влияние соседних сооружений (аэродинамическую интерференцию), а также не позволяют моделировать спектр турбулентных пульсаций ветра с достаточной точностью. Кроме того, одной из проблем нормативных подходов к определению динамического отклика зданий и сооружений является невозможность учитывать поперечные, действующие перпендикулярно ветровому потоку, а также крутильные колебания, по причине их базирования на спектре Давенпорта, описывающего энергетическое распределение турбулентных пульсаций скорости ветра вдоль направления основного ветрового потока. Предлагаемая в настоящей работе методика численного моделирования охватывает и учитывает эти проблемы и недостатки существующих нормативных методик.

Предложенная методика позволяет более точно прогнозировать динамический отклик высотных зданий на ветровые воздействия по сравнению с нормативными подходами, что имеет важное значение для обеспечения их механической безопасности и динамической комфортности. Особенно это актуально для высотных зданий со сложной геометрией и плотной застройкой, где динамические эффекты ветра могут приводить к значительным колебаниям. Рекомендуется внедрение данной методики в практику расчетных обоснований для проектирования высотных зданий, что позволит оптимизировать конструктивные решения, повысить механическую безопасность и увеличить экономическую эффективность высотного строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соловьев А., Никонова Е., Герасимов А. Проектирование зданий и сооружений. М., 2022. 76 с.
2. Рыбакова Л.Ю., Балашова Е.Я. Высотные здания: проектирование, анализ и безопасность // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : сб. статей 80-й Юбилейной Всеросс. науч.-техн. конф. 2023. С. 55–61. EDN FUXTVT.
3. Yadav H., Roy A.K. Wind-induced aerodynamic responses of triangular high-rise buildings with varying cross-section areas // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2722. DOI: 10.3390/buildings14092722
4. Shan W., Yang Q., Guo K., Chen C., Zhen W., Kim Y.C. Across-wind response characteristics of tall-square towers in urban flow: An experimental study focused on the aeroelastic effects // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36. Issue 3. DOI: 10.1063/5.0194289
5. Abdelwahab M., Ghazal T., Nadeem K., Aboshsha H., Elshaer A. Performance-based wind design for tall buildings : review and comparative study // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 68. P. 106103. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.106103
6. Xu Z., Yin J. The Influence of Aeroelastic Effects on Wind Load and Wind-Induced Response of a Super-Tall Building: An Experimental Study // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 7. P. 1871. DOI: 10.3390/buildings13071871
7. Wijesooriya K., Mohotti D., Mendis P. A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future // Journal of Building Engineer-

ing. 2023. Vol. 74. P. 106828. DOI: 10.1016/j.job.2023.106828

8. Hareendran S.P., Alipour A., Shafei B., Sarkar P. Characterizing wind-structure interaction for performance-based wind design of tall buildings // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 289. P. 115812. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115812

9. Саиян С.Г., Ефимова А.М. Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 6. С. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941

10. Mengistu M.T., Repetto M.P. Analytical downburst wind load calculation methods: Review and full-scale validation // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 321. P. 118970. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118970

11. Zhao S., Zhang C., Dai X., Yan Z. Review of wind-induced effects estimation through nonlinear analysis of tall buildings, high-rise structures, flexible bridges and transmission lines // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 8. P. 2033. DOI: 10.3390/buildings13082033

12. Варибрус Д.С., Грибанов Д.С. Методика расчета реакции сооружения на пульсации ветра // *Инновационная наука*. 2021. № 5. С. 35–37. EDN FCIXXI.

13. Негрозова И.Ю., Афанасьева И.Ю. Обзор аналитических и полуэмпирических подходов для анализа аэродинамической неустойчивости типа флаттер // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2023. № 1 (54). С. 119–140. DOI: 10.24866/2227-6858/2023-1/119-140. EDN MCXFEQ.

14. Kwon D.K., Kareem A. Hybrid simulation of a tall building with a double-decker tuned sloshing damper system under wind loads // *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2020. Vol. 29. Issue 15. DOI: 10.1002/tal.1790

15. Илюхина Е.А., Лахман С.И., Миллер А.Б., Трапуш В.И. Конструктивные решения высотного здания «Лахта центр» в Санкт-Петербурге // *Academia. Архитектура и строительство*. 2019. № 3. С. 110–121. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-3-110-121. EDN MLORRC.

16. Ding F., Kareem A. Tall buildings with dynamic facade under winds // *Engineering*. 2020. Vol. 6. Issue 12. Pp. 1443–1453. DOI: 10.1016/j.eng.2020.07.020

17. Саиян С.Г. Моделирование ускорений верхних этажей высотного здания при ветровом воздействии // *Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ студентов Института фундаментального образования НИУ МГСУ за 2019–2020 учебный год*. 2020. С. 295–298. EDN JHLVLJ.

18. Saiyan S., Andreev V., Paushkin A. Numerical Simulation of Accelerations of the Upper Floors of a High-Rise Building Under Wind Influence // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Pp. 269–279. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_25

19. Sun W., Wang X., Dong D., Zhang M., Li Q. A comprehensive review on estimation of equivalent static wind loads on long-span roofs // *Advances in Structural Engineering*. 2023. Vol. 26. Issue 14. Pp. 2572–2599. DOI: 10.1177/13694332231190706

20. Zhang S., Guo K., Yang Q., Xu X. Review of wind field characteristics of downbursts and wind effects on structures under their action // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2653. DOI: 10.3390/buildings14092653

21. Bruno L., Coste N., Mannini C., Mariotti A., Patrino L., Schito P. et al. Codes and standards on computational wind engineering for structural design: State of art and recent trends // *Wind and Structures*. 2023. Vol. 37. Pp. 133–151. DOI: 10.12989/was.2023.37.2.133

22. Мишинцев Д.К. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных норм в части определения ветровой нагрузки на здания // *Потенциал интеллектуально одаренной молодежи — развитию науки и образования : мат. XII Междунар. науч. форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников*. 2023. С. 482–485. EDN FAFZOA.

23. Tiwari L., Asher A., Deshpande A., Murudi M. Analysis of 150 m long wind mast using Indian code, U.S. Code & Eurocode // *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3013. P. 030003. DOI: 10.1063/5.0204653

24. Baballëku M., Verzivolli A., Luka R., Zgjanolli R. Fundamental basic wind speed in Albania: An adoption in accordance with Eurocodes // *Journal of Transactions in Systems Engineering*. 2023. Vol. 1. Issue 2. Pp. 56–72. DOI: 10.1515/JTSE.2023.1.2.56-72

25. Llanes-Tizoc M.D., Valenzuela-Beltrán F., Bojórquez E., Bojórquez J., Gaxiola-Camacho J.R., Leal-Graciano J.M. et al. Rayleigh damping vs. modal damping matrix superposition for steel frames and evaluation of higher-mode contribution // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024. DOI: 10.1007/s40996-024-01615-2

26. Miyamoto K., She J., Sato D., Chen Y., Soriano R.D.A., Nakano S. Wind-load estimation for seismically isolated building by equivalent-input-disturbance approach with robust-control strategy // *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 145. P. 105853. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.105853

27. Сидоров В.Н., Бадьина Е.С., Климушкин Д.О. Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 6. С. 960–970. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970. EDN MYGSCN.

Поступила в редакцию 15 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 29 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 29 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Гургенович Саиян** — научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865, ResearcherID: AAT-1424-2021; Berformert@gmail.com;

Артемию Викторовичу Васильеву — студент; **Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)**; 119991, г. Москва, Ленинский пр-т; vasilev.artemiy@yandex.ru.

Вклад авторов:

Саиян С.Г. — научное руководство, концепция исследования, методология исследования, методика численного моделирования, разработка расчетных моделей, анализ и обработка результатов исследования, написание текста статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Васильев А.В. — сбор и анализ материалов по ММДЦ «Москва-Сити», проведение расчетных исследований, создание иллюстраций, обработка и анализ результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Soloviev A., Nikonova E., Gerasimov A. *Design of Buildings and Structures*. Moscow, 2022; 76. (rus.).
2. Rybakova L.Y., Balashova E.Y. High-rise buildings: design, analysis and safety. Traditions and innovations in construction and architecture. *Construction and construction technologies : collection of articles of the 80th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2023; 55-61. EDN FUXTVT. (rus.).
3. Yadav H., Roy A.K. Wind-Induced Aerodynamic Responses of Triangular High-Rise Buildings with Varying Cross-Section Areas. *Buildings*. 2024; 14(9):2722. DOI: 10.3390/buildings14092722
4. Shan W., Yang Q., Guo K., Chen C., Zhen W., Kim Y.C. Across-wind response characteristics of tall-square towers in urban flow: An experimental study focused on the aeroelastic effects. *Physics of Fluids*. 2024; 36(3). DOI: 10.1063/5.0194289
5. Abdelwahab M., Ghazal T., Nadeem K., Abo-shosha H., Elshaer A. Performance-based wind design for tall buildings : review and comparative study. *Journal of Building Engineering*. 2023; 68:106103. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.106103
6. Xu Z., Yin J. The influence of aeroelastic effects on wind load and wind-induced response of a super-tall building: an experimental study. *Buildings*. 2023; 13(7):1871. DOI: 10.3390/buildings13071871
7. Wijesooriya K., Mohotti D., Mendis P. A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future. *Journal of Building Engineering*. 2023; 74(106828). DOI: 10.1016/j.jobee.2023.106828
8. Hareendran S.P., Alipour A., Shafei B., Sarkar P. Characterizing wind-structure interaction for performance-based wind design of tall buildings. *Engineering Structures*. 2023; 289:115812. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115812
9. Saiyan S.G., Efimova A.M. Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):906-941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941 (rus.).
10. Mengistu M.T., Repetto M.P. Analytical down-burst wind load calculation methods: review and full-scale validation. *Engineering Structures*. 2024; 321:118970. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118970
11. Zhao S., Zhang C., Dai X., Yan Z. Review of Wind-Induced Effects Estimation through Nonlinear Analysis of Tall Buildings, High-Rise Structures, Flexible Bridges and Transmission Lines. *Buildings*. 2023; 13(8):2033. DOI: 10.3390/buildings13082033
12. Varibrus D.S., Gribanov D.S. Methodology for calculating the response of a structure to wind pulsations. *Innovative Science*. 2021; 5:35-37. EDN FCIXXI. (rus.).
13. Negrozova I.Yu., Afanasyeva I.N. A review of analytical and semi-empirical approaches for analysis of flutter aerodynamic instability. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023; 1(54):119-140. DOI: 10.24866/2227-6858/2023-1/119-140. EDN MCXFEQ. (rus.).
14. Kwon D.K., Kareem A. Hybrid simulation of a tall building with a double-decker tuned sloshing damper system under wind loads. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2020; 29(15). DOI: 10.1002/tal.1790
15. Ilyukhina E.A., Lahman S.I., Miller A.B., Travush V.I. Design solutions of the high-rise building “Lakhta center” in Saint-Petersburg. *Academia. Architecture and Construction*. 2019; 3:110-121. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-3-110-121. EDN MLORRC. (rus.).
16. Ding F., Kareem A. Tall buildings with dynamic facade under winds. *Engineering*. 2020; 6(12):1443-1453. DOI: 10.1016/j.eng.2020.07.020
17. Saiyan S.G. Modeling the acceleration of the upper floors of a high-rise building under wind action. *Days of Student Science : collection of reports of the scientific*

and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Fundamental Education of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering for the 2019-2020 academic year. 2020; 295-298. EDN JHLVLJ. (rus.).

18. Saiyan S., Andreev V., Paushkin A. Numerical simulation of accelerations of the upper floors of a high-rise building under wind influence. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 269-279. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_25

19. Sun W., Wang X., Dong D., Zhang M., Li Q. A comprehensive review on estimation of equivalent static wind loads on long-span roofs. *Advances in Structural Engineering*. 2023; 26(14):2572-2599. DOI: 10.1177/13694332231190706

20. Zhang S., Guo K., Yang Q., Xu X. Review of Wind Field Characteristics of Downbursts and Wind Effects on Structures under Their Action. *Buildings*. 2024; 14(9):2653. DOI: 10.3390/buildings14092653

21. Bruno L., Coste N., Mannini C., Mariotti A., Patruno L., Schito P. et al. Codes and standards on computational wind engineering for structural design: State of art and recent trends. *Wind and Structures*. 2023; 37:133-151. DOI: 10.12989/was.2023.37.2.133

22. Mishichev D.K. Comparative analysis of domestic and foreign standards in terms of determining wind load on buildings. *The potential of intellectually gifted youth — the development of science and education : materials of the XII International Scientific Forum*

of Young Scientists, Innovators, Students and Schoolchildren. 2023; 482-485. EDN FAFZOA. (rus.).

23. Tiwari L., Asher A., Deshpande A., Murudi M. Analysis of 150 m long wind mast using Indian code, U.S. Code & Eurocode. *AIP Conference Proceedings*. 2024; 3013:030003. DOI: 10.1063/5.0204653

24. Baballëku M., Verzivoli A., Luka R., Zgjanoli R. Fundamental basic wind speed in Albania: An adoption in accordance with Eurocodes. *Journal of Transactions in Systems Engineering*. 2023; 1(2):56-72. DOI: 10.15157/JTSE.2023.1.2.56-72

25. Llanes-Tizoc M.D., Valenzuela-Beltrán F., Bojórquez E., Bojórquez J., Gaxiola-Camacho J.R., Leal-Graciano J.M. et al. Rayleigh Damping vs. Modal Damping Matrix Superposition for Steel Frames and Evaluation of Higher-Mode Contribution. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024. DOI: 10.1007/s40996-024-01615-2

26. Miyamoto K., She J., Sato D., Chen Y., Soriano R.D.A., Nakano S. Wind-load estimation for seismically isolated building by equivalent-input-disturbance approach with robust-control strategy. *Control Engineering Practice*. 2024; 145:105853. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.105853

27. Sidorov V.N., Badina E.S., Klimushkin D.O. Modification of Rayleigh dissipation function for numerical simulation of internal damping in rod structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):960-970. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970. EDN MYGSCN. (rus.).

Received November 15, 2024.

Adopted in revised form on November 29, 2024.

Approved for publication on November 29, 2024.

B I O N O T E S: **Sergey G. Saiyan** — researcher at the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865, ResearcherID: AAT-1424-2021; Berformert@gmail.com;

Artemiy V. Vasiliev — student; **National University of Oil and Gas “Gubkin University”**; 65 Leninskiy pr., Moscow, 119991; vasiliev.artemiy@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Sergey G. Saiyan — scientific guidance, research concept, research methodology, numerical modeling techniques, development of calculation models, analysis and processing of research results, writing the text of the article, scientific editing of the text, final conclusions.

Artemiy V. Vasiliev — collection and analysis of materials on MIBC «Moscow-City», computational research, creation of illustrations, processing and analysis of research results.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Комплексная модификация пенобетона неавтоклавного твердения

Дарья Дмитриевна Нецвет¹, Мариана Николаевна Сивальнева²,
Виктория Викторовна Нелюбова², Валерия Валерьевна Строкова²

¹ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (СТИ НИТУ МИСИС);

г. Старый Оскол, Россия;

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из распространенных строительных материалов является ячеистый бетон. Повышение его эффективности может быть обеспечено проведением комплексной модификации. Предложено рецептурно-технологическое решение по получению неавтоклавного пенобетона, которое заключается в применении комплекса модифицирующих добавок, включающих минеральные дисперсные и микроармирующие компоненты. Их введение способствует стабилизации пенобетонной смеси, регулированию процессов структурообразования и управления эксплуатационными показателями готового материала.

Материалы и методы. Использовались портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, протеиновый пенообразователь «Эталон». Модифицирование пенобетона осуществлялось: кварцевой суспензией, получаемой путем мокрого помола кварцевого песка, синтезированным ангидритом, активатором твердения Na_2SO_4 , базальтовой и стеклянной фибрами. Основные физико-механические характеристики пенобетона определялись по действующим нормативно-техническим документам. Микроструктура изучалась посредством растровой электронной микроскопии.

Результаты. Установлено влияние рецептурных факторов на эксплуатационные показатели качества неавтоклавного пенобетона теплоизоляционного назначения, проведена многокритериальная оптимизация, определены рациональные составы. Получены материалы с маркой по плотности D500 и классом по прочности B1,5–B2.

Выводы. Замена части портландцементного вяжущего на дисперсный модификатор в комплексе с микроармирующими волокнами позволяет получать материалы с повышенными свойствами при сниженных затратах на производство, а именно за счет оптимизации ячеистой структуры повышаются показатели по прочности при сохранении значений плотности и теплопроводности. Данное рецептурное решение приводит к уплотнению и упрочнению межпоровых перегородок, как следствие, «монокристаллизации» матрицы и каркасной структуры композита, создаваемой микроармирующими компонентами. Материал характеризуется полидисперсной пористостью с широким диапазоном размеров пор с формой, переходящей с правильной округлой на многогранную. В результате повышаются физико-механические и теплоизолирующие показатели пенобетона неавтоклавного твердения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пенобетон, модификация, дисперсные компоненты, базальтовая фибра, стеклянная фибра, микроструктура, неавтоклавное твердение

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нецвет Д.Д., Сивальнева М.Н., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Комплексная модификация пенобетона неавтоклавного твердения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 280–290. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.280-290

Автор, ответственный за переписку: Мариана Николаевна Сивальнева, 549041@mail.ru.

Complex modification of non-autoclaved foam concrete

Daria D. Netsvet¹, Mariana N. Sivalneva², Victoria V. Nelyubova², Valeria V. Stroкова²

¹ Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the National University of Science and Technology "MISIS" (STI NUST MISIS); Sary Oskol, Russian Federation;

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Cellular concrete is one of the most common building materials. Increase of its efficiency can be ensured by carrying out a complex modification. The paper proposes a formulation and technological solution for the production of non-autoclaved foam concrete, which consists in the use of a complex of modifying additives, including mineral dispersed and micro-reinforcing components. Their introduction contributes to stabilization of the foam concrete mixture, regulation of the processes of structure formation and control the performance of the finished material.

Materials and methods. Portland cement of CEM I 42.5N grade, protein foaming agent “Etalon” were used. Modification of foam concrete was carried out by: quartz suspension obtained by wet milling of quartz sand, synthesized anhydrite, hardening activator Na_2SO_4 , basalt and glass fibres. The main physical and mechanical characteristics of foam concrete were determined according to the current regulatory and technical documents. The microstructure was studied using scanning electron microscopy.

Results. The influence of formulation factors on the operational quality indicators of non-autoclaved foam concrete for thermal insulation purposes was established, multicriteria optimization was carried out, rational compositions were determined. Materials with a density grade of D500 and a strength class of B1.5–B2 were obtained.

Conclusions. The replacement of a part of the Portland cement binder with a dispersed modifier in combination with micro-reinforcing fibres makes it possible to obtain materials with improved properties at reduced production costs, namely, by optimizing the cellular structure, strength indicators increase while maintaining density and thermal conductivity values. This formulation solution leads to the compaction and strengthening of the interpore partitions, as a result, the “monolithization” of the matrix and the frame structure of the composite created by micro-reinforcing components. The material is characterized by polydisperse porosity with a wide range of pore sizes with a shape transitioning from regular rounded to polyhedral. As a result, the physico-mechanical and thermal insulation properties of non-autoclaved foam concrete are increased.

KEYWORDS: foam concrete, modification, dispersed components, basalt fibre, glass fibre, microstructure, non-autoclave hardening

Acknowledgements. The work was realized within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2023-0006 using equipment of High Technology Centre at BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Netsvet D.D., Sivalneva M.N., Nelyubova V.V., Strokova V.V. Complex modification of non-autoclaved foam concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):280-290. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.280-290 (rus.).

Corresponding author: Mariana N. Sivalneva, 549041@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация строительства за счет повышения теплотехнических показателей конструкций и качества материалов в целом является основополагающей задачей современного развития фондов производственного и непроизводственного назначения. Ее решение сводится к разработке материалов, сочетающих высокие эксплуатационные свойства, энергоэффективность, технико-экономическую обоснованность, сниженный прессинг на экологию, расширенную область применения, что может реализовываться в производстве ячеистых бетонов, а именно пенобетонов неавтоклавного твердения [1–5].

Потребность в данных материалах определяет необходимость тщательного проектирования и подбора рецептурно-технологических параметров, что позволяет регулировать и управлять качественными и структурными характеристиками готовых композитов [6, 7]. По результатам литературного обзора российских и зарубежных авторов можно выделить основные решения, приводящие к повышению качества неавтоклавных пенобетонов:

- применение композиционных цементных вяжущих [8, 9];
- применение бесцементных вяжущих (гипсовых [10], геополимерных [11], шлакосиликатных [12, 13], высококонцентрированных и др.) [3, 14, 15];
- использование дисперсных компонентов с повышенной активностью и/или инертностью [15–17];
- стабилизация пены за счет введения химических стабилизаторов, комплексных способов поризации [18–21] и др.

Возможность упрочнения матричной системы пенобетона на цементной основе реализуется несколь-

кими способами: физический заключается в формировании высокоплотной упаковки твердой фазы и уплотнении межпорового пространства, что достигается введением полидисперсных наполнителей различной морфологии; химический основан на росте доли кристаллических фаз, который обусловлен процессом взаимного воздействия цемента и пуццолановых добавок. Максимальные результаты от указанных способов возможно получить при комплексном воздействии, которое реализуется рациональным подбором модифицирующих добавок, что, в свою очередь, не несет значительных технологических изменений.

Особое внимание следует уделить применению тонкодисперсных компонентов из природного сырья и суспензии на его основе, которая выполняет роль активной минеральной добавки в системе ячеистого композита, что реализуется авторским коллективом в технологии пенобетонов неавтоклавного твердения. Ранее установлен модифицированный состав ячеистого бетона, включающий фиброволокно, ангидрит и кварцевую суспензию (КС), заменяющую долю цемента на 20 %. В результате достигается стабильность во времени пены и рост прочностных характеристик композита [22].

В работе рассмотрена возможность регулирования структурообразующих процессов на различных этапах твердения за счет применения минеральных добавок с высокой дисперсностью, которые стабилизируют бетонные смеси в период схватывания с последующей интенсификацией твердения. Данное решение имеет важное практическое значение, обусловленное ростом эксплуатационных характеристик материала при условии технико-экономической эффективности.

В связи с вышесказанным целью представленной работы стала разработка пенобетона марки D500 неавтоклавного твердения, модификация которого возможна путем введения в состав дисперсных компонентов различной геометрии и состава, а именно микроармирующей добавки как протяженной структуры, ангидрита и КС как высокодисперсных компонентов. Проведено исследование и анализ основных физико-механических характеристик и микроструктурных особенностей разработанного ячеистого композита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При получении неавтоклавного пенобетона использовались портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н (производитель ЗАО «Белгородский цемент»); пенообразователь (ПО) «Эталон», относящийся к протениновым (производитель ООО «АИСТ»). Модифицирование материала осуществлялось:

- кварцевой суспензией, получаемой путем мокрого помола кварцевого песка (месторождение Белгородской области) с модулем крупности 2,5 и насыпной плотностью $1430 \pm 10 \text{ кг/м}^3$. Данный компонент вводился в количестве 20 %, заменяя часть основного вяжущего — цемента;
- синтезированным ангидритом, используемым в дозировке 5 % от массы цемента;
- Na_2SO_4 , используемым в качестве активатора твердения ангидрита (1 % от массы ангидрита);
- фиброволокнами — базальтовой (производитель ООО «Каменный век») и стеклянной фибрами (ООО «Альянс – Строительные технологии»).

Ключевые физико-механические характеристики полученного пенобетона определялись в соответствии с методами, представленными в действующих нормативно-технических документах: ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»; ГОСТ 12730.1–2020

«Бетоны. Методы определения плотности»; ГОСТ 24816–2014 «Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности»; ГОСТ 25898–2020 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию»; ГОСТ 30256–94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом».

Для установления микроструктурных особенностей образцов использовался растровый электронный микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU. Изучению подвергался внутренний объем материала, для этого проводилась пробоподготовка, заключающаяся в получении «свежего» скола. Далее с целью остановки процессов гидратации образцы помещались в раствор спирта. Непосредственно перед испытанием образец был извлечен и высушен.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе рассматривается получение пенобетона марки D500 неавтоклавного твердения, получаемого с использованием комплекса минеральных модификаторов и фибры. Указанная марка выбрана ввиду широкого распространения на производстве, а также она является пограничной между теплоизоляционными и конструкционно-теплоизоляционными ячеистыми композитами.

Для выявления преимуществ разрабатываемого материала первоначально были рассчитаны составы: контрольный (бездобавочный) — классическая рецептура, и модифицированный (табл. 1).

Отдельное внимание следует уделить подбору водотвердого отношения (В/Т) ввиду необходимости учета того, что определенная доля воды включена в состав кварцевой суспензии, а оставшаяся часть расходуется в процессе получения пены с плотностью 60 г/л. В данном случае В/Т в пенобетонной смеси принималось равным 0,5.

Табл. 1. Расход компонентов пенобетона в зависимости от состава

Table 1. Consumption of foam concrete components depending on the composition

ПЦ, кг Portland cement, kg	ПО, л Foaming agent, l	Вода, л Water, l	КС, кг Quartz suspension, kg	Ангидрит, кг Anhydrite, kg	Na_2SO_4 , кг Na_2SO_4 , kg	Фибра, кг Fibre, kg
454	4,5	227	–	–	–	–
348	4,5	212,5	105	17	0,17	0,27

Табл. 2. Условия планирования эксперимента

Table 2. Experimental planning conditions

Факторы Factors		Уровни варьирования Levels of variation			Шаг Step
Натуральный вид / Natural name	Кодированный вид / Coded name	–1	0	+1	
Концентрация фиброволокна, % Concentration of fibre, %	x_1	0	0,06	0,12	0,06
Водотвердое отношение Water-solid ratio	x_2	0,4	0,5	0,6	0,1

Проектирование состава материала осуществлялось с применением метода полного факторного эксперимента. Параметры варьирования — концентрация волокон фибры и В/Т (табл. 2).

Определение рациональности состава проводилось по выходным параметрам: прочности на сжатие, средней плотности и коэффициенту теплопроводности. Эти данные положены в основу матрицы планирования (табл. 3) и экспериментальную работу при

установлении физико-механических свойств пенобетона (табл. 4).

Оценка оптимизации свойств производилась путем анализа номограмм физико-механических характеристик полученных составов (рис. 1).

Согласно полученным результатам, можно отметить незначительное снижение плотности при увеличении водотвердого отношения. Более значительное изменение плотности, а именно уплотнение меж-

Табл. 3. Матрица планирования эксперимента

Table 3. Experiment planning matrix

Составы Composition	Номер точки плана Plan point number	Точки плана / Points			
		x_1	x_2	Концентрация фиброволокна, % Concentration of fibre, %	В/Т W/S
Контрольный состав Control composition	1	–1	–1	0	0,4
	2	–1	0	0	0,5
	3	–1	+1	0	0,6
Модифицированный состав (базальтовая фибра) Modified composition (basalt fibre)	4	0	–1	0,06	0,4
	5	0	0	0,06	0,5
	6	0	+1	0,06	0,6
	7	+1	–1	0,12	0,4
	8	+1	0	0,12	0,5
	9	+1	+1	0,12	0,6
Модифицированный состав (стеклянная фибра) Modified composition (glass fibre)	10	0	–1	0,06	0,4
	11	0	0	0,06	0,5
	12	0	+1	0,06	0,6
	13	+1	–1	0,12	0,4
	14	+1	0	0,12	0,5
	15	+1	+1	0,12	0,6

Табл. 4. Выходные параметры для расчетных составов

Table 4. Output parameters for calculated compositions

Составы Composition	Номер точки плана Plan point number	Средняя плотность ρ , кг/м ³ Average density ρ , kg/m ³	Прочность на сжатие R , МПа Compressive strength R , MPa	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C) Coefficient of thermal conductivity λ , W/(m·°C)
Контрольный состав Control composition	1	504	1,46	0,125
	2	504	2,03	0,119
	3	500	2	0,122
Модифицированный состав (базальтовая фибра) Modified composition (basalt fibre)	4	501	1,69	0,118
	5	502	2,16	0,119
	6	500	1,92	0,117
	7	502	2,33	0,121
	8	500	2,45	0,118
	9	502	2,05	0,116
Модифицированный состав (стеклянная фибра) Modified composition (glass fibre)	10	503	2,03	0,121
	11	502	2,2	0,120
	12	500	2,07	0,116
	13	501	2,4	0,120
	14	503	2,44	0,116
	15	502	2,23	0,117

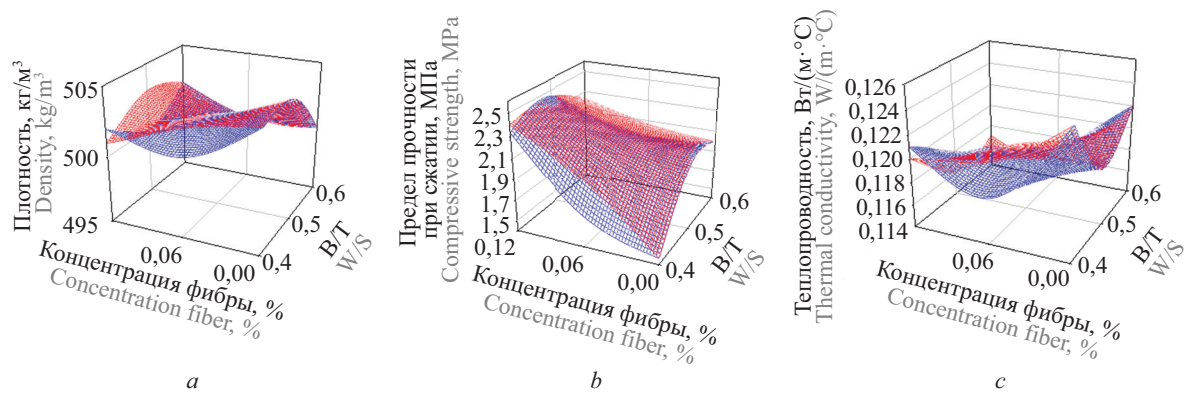


Рис. 1. Зависимость физико-механических характеристик пенобетона от концентрации фиброволокна и водотвердого отношения: *a* — средняя плотность; *b* — прочность на сжатие; *c* — теплопроводность; синяя номограмма — базальтовая фибра; красная номограмма — стеклянная фибра

Fig. 1. Dependence of the physical and mechanical characteristics of foam concrete from the concentration of fibre and the water-solid ratio: *a* — average density; *b* — compressive strength; *c* — thermal conductivity; blue nomograph — basalt fibre; red nomograph — glass fibre

поровых перегородок и рост плотности композита в целом, вызывает введение фибры в ячеистую систему, что может быть вызвано несколькими факторами:

- 1) увеличением в системе доли твердой фазы;
- 2) кластерообразованием, связанным с «осаждением» твердых частиц и их агрегированием на протяженной поверхности фибры [23].

Соответственно, уплотнение структуры композита сказывается и на прочности. Увеличение содержания фибры вплоть до 0,12 % способствует росту предела прочности. При этом достигаемые значения прочности составов с волокнами различного вида практически сопоставимы, что говорит о незначительном влиянии вида волокна на прочностные показатели.

Вторым входным параметром являлось водотвердое отношение, увеличение которого влечет за собой некоторое падение показателей прочности. Подтверждена оптимальность В/Т, равного 0,5 для пенобетона марки D500. Дальнейшее повышение В/Т увеличивает подвижность смеси, но негативно сказывается на прочностных характеристиках, а снижение В/Т приводит к недостаточной смачиваемости твердых частиц, неоднородности смеси и снижению прочности.

Данный показатель также оказывает влияние на теплопроводность пенобетона, которая снижается при увеличении В/Т и концентрации волокна в системе. Объяснением может служить повышение подвижности смеси и, как следствие, равномерности распределения воздушных пузырьков во всем объеме системы, а введение волокон способствует образованию дополнительных воздушных каналов. Таким образом, формирование условий для комплексной поризации полученного массива обеспечивает рост теплоизолирующей способности готового композита.

Полученные свойства модифицированного пенобетона удовлетворяют ГОСТ 25485–2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия». На основании экстремальных значений качества определе-

ны два оптимальных состава с использованием базальтовой (состав 1) и стеклянной фибры (состав 2) (табл. 5).

Немаловажным при оценке качества разработанного материала является сравнение со значениями бездобавочного состава (табл. 6). Модифицированный состав пенобетона характеризуется снижением средней плотности, при этом прочность на сжатие увеличивается на 56 % от контрольного образца. Эта зависимость может быть вызвана оптимальной поризацией системы и уплотнением межпоровой перегородки.

Современные исследования не обходятся без изучения микроструктуры материалов [24]. В данном случае оценены морфологические и структурные особенности образцов неавтоклавного пенобетона с выявлением их влияния на качественные показатели.

Все образцы вне зависимости от состава имеют ярко выраженную ячеистую структуру с однородным распределением полимодальных пор, имеющих преимущественно сферическую форму с четко выделенной межпоровой перегородкой между ними (рис. 2).

Для установления роли каждого компонента модифицированных составов отдельно рассматривались образцы пенобетона на композиционном вяжущем, с фиброй каждого типа и без нее. Так, введение кварцевой суспензии, выступающей дисперсным модификатором, как частичная замена портландцемента, привело к увеличению общей пористости композита с размером пор, находящимся в диапазоне 0,5–2 мм, с изменением толщины границы между ними. Дисперсный компонент изменяет толщину межпоровых перегородок с диапазона 130–250 мкм (бездобавочный образец) до диапазона 80–150 мкм (рис. 2, *b, d*). У образцов модифицированных составов отмечается уплотнение структуры матрицы (рис. 2, *d, f, h*), что, в свою очередь, и оказывает существенное влияние на прочностные показатели материалов. Эти изме-

Табл. 5. Составы и свойства модифицированного пенобетона

Table 5. Composition and characteristics of modified foam concrete

Состав/свойства Composition/characteristics	Состав 1 Composition 1	Состав 2 Composition 2
<i>Рациональный состав на 1 м³ / Rational composition for 1 m³</i>		
Цемент, кг Cement, kg	348	348
Пенообразующая добавка, л Foaming agent, l	4,5	4,5
Вода для раствора, л Water for mortar, l	226	226
Кварцевая суспензия, кг Quartz suspension, kg	104	104
Ангидрит, кг Anhydrite, kg	17	17
Na ₂ SO ₄ , кг Na ₂ SO ₄ , kg	0,17	0,17
Фибра, кг Fibre, kg	0,27	0,27
<i>Свойства / Characteristics</i>		
Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	500	499
Предел прочности при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	2,5	2,4
Класс по прочности Strength class	B2	B1,5
Марка по морозостойкости Frost resistance brand	F25	F25
Теплопроводность, Вт/(м·°C) Thermal conductivity, W/(m·°C)	0,118	0,120
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па) Vapour permeability, mg/(m·h·Pa)	0,23	0,22
Сорбционная влажность, % Sorption humidity, % при влажности воздуха 75 % at air humidity 75 % при влажности воздуха 95 % at air humidity 95 %	7,2 10,1	7,4 10,7

нения обусловлены наличием микроармирующих элементов, монолитностью структуры перегородки (рис. 2, *ж*). Следует отметить гладкость поверхности пор, хорошую ограниченность и ровную поверхность их края.

Использование протяженного компонента вносит отклонения в пористость системы (рис. 2, *е–ж*). Также необходимо оценить расположение и распределение волокна в матрице и их совместное взаимодействие, что позволяет выявить морфологические

Табл. 6. Основные физико-механические показатели модифицированного и контрольного составов пенобетона

Table 6. The main physical and mechanical parameters of the modified and control compositions of foam concrete

Состав пенобетона Composition of foam concrete	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Теплопроводность, Вт/(м·°C) Thermal conductivity, W/(m·°C)
Контрольный состав Control composition	1,6	510	0,118
Состав 1 Composition 1	2,5	500	0,118
Состав 2 Composition 2	2,4	503	0,118

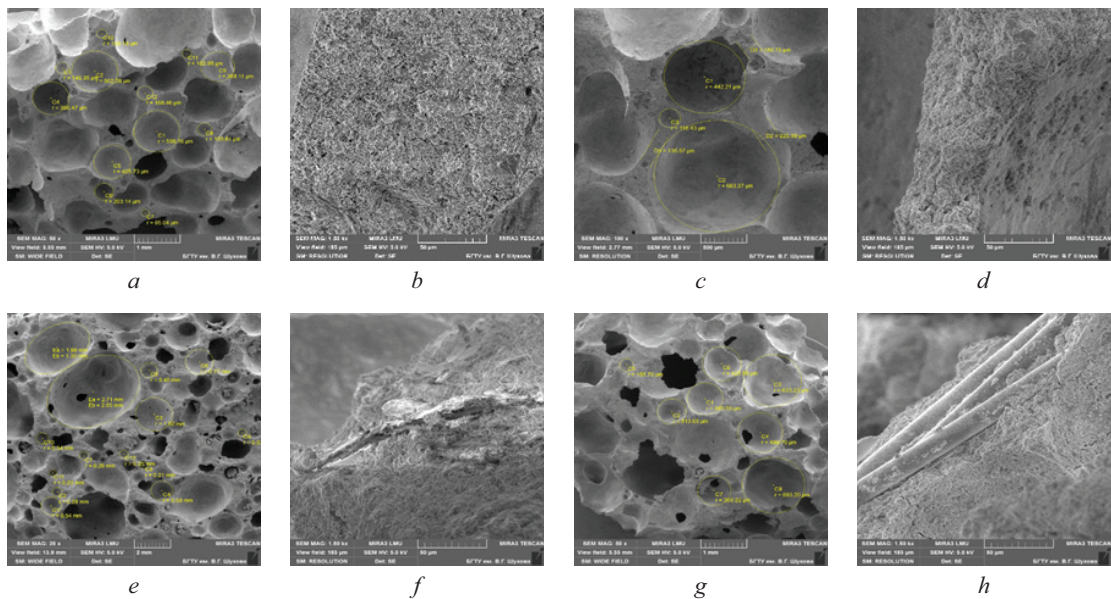


Рис. 2. Микроструктурные особенности пенобетона: *a, b* — пенобетон на цементном вяжущем; *c, d* — пенобетон с дисперсными добавками; *e, f* — пенобетон с дисперсными добавками и базальтовой фиброй; *g, h* — пенобетон с дисперсными добавками и стеклянной фиброй

Fig. 2. Microstructural features of foam concrete: *a, b* — foam concrete based on cement; *c, d* — foam concrete with dispersed additives; *e, f* — foam concrete with dispersed additives and basalt fibre; *g, h* — foam concrete with dispersed additives and glass fibre

особенности порового пространства и структуры ячеистого композита в целом.

Базальтовая фибра (рис. 2, *e, f*) преобразует форму ячеистой структуры: формируются овальные и многогранные поры разного поперечного размера. Но при этом, сравнивая с образцом только с дисперсными добавками, размерные параметры пор сохраняются ($d = 0,9–2,02$ мм). Волокна размещаются в межпоровом пространстве, создавая каркасность ячеистой структуры композита. Наблюдается высокая адгезия матрицы композита к поверхности волокна, которое «обрастает» большим количеством новообразований. В качестве негативного фактора выступает деформация базальтового волокна и уменьшение его диаметра, что связано с воздействием щелочной среды, присущей цементным системам.

Другой вид фибры (стеклянная) характеризуется неравномерностью распределения волокон, отмечаются их скопления с образованием комков (рис. 2, *h*). Поверхность стеклянной фибры покрыта незначительным количеством кристаллических новообразований, что свидетельствует о низкой степени адгезии вяжущего к данному виду волокон. Стеклянная фибра в пенобетоне на композиционном вяжущем приводит к уменьшению размеров пор (0,3–1,5 мм), форма которых преимущественно правильная сферическая. Полидисперсность поровых структур сохраняется и не зависит от типа волокна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов, данные физико-механических характеристик, морфоструктурные

особенности позволили подтвердить целесообразность разработки микроармированного пенобетона, получаемого по технологии неавтоклавного твердения на основе композиционного вяжущего с использованием дисперсного модификатора. Показана роль стабилизирующих компонентов ячеистобетонной смеси с учетом их взаимодействия в системе.

В поэтапном выполнении работы были определены составы с оптимальными значениями компонентов, водотвердым отношением, типом и дозировкой фиброволокон, а также закономерности их влияния на физико-механические характеристики неавтоклавного пенобетона.

Таким образом, разработано рецептурно-технологическое решение, направленное на получение неавтоклавного пенобетона теплоизоляционного назначения, отличающееся применением модифицирующих компонентов в виде минеральных дисперсных добавок (кварцевой суспензии, ангидрита) и микроармирующих волокон (базальтовой или стеклянной фибры). Получены материалы с маркой по плотности D500 и классом по прочности B1,5–B2. Предложенные составы имеют уплотненные и упрочненные межпоровые перегородки, что приводит к «монолитизации» матрицы и каркасной структуры композита, создаваемой микроармирующими компонентами. Ячеистый материал приобретает полидисперсную пористость с широким диапазоном размеров пор с формой, переходящей с правильной округлой на многогранную. В результате повышаются физико-механические и теплоизолирующие показатели пенобетона неавтоклавного твердения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Elrahman M.A., El Madawy M.E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 7. P. 1447. DOI: 10.3390/app9071447
2. Zeng X., Lan X., Zhu H., Liu H., Umar H.A., Xie Y. et al. A review on bubble stability in fresh concrete: Mechanisms and main factors // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 8. P. 1820. DOI: 10.3390/MA13081820
3. Zhou G., Su R.K.L. A review on durability of foam concrete // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 7. P. 1880. DOI: 10.3390/buildings13071880
4. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete : a review // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 990–1005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112
5. Моргун Л.В., Немилостивый А.Г., Гебру Б.К., Моргун В.Н. Эволюция применения в строительстве легких бетонов // *Химия, физика и механика материалов*. 2022. № 4 (35). С. 21–36. EDN KTRFDJ.
6. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Gudov D.V., Shurakov I.M., Korbut E.E. Optimization of receptural-technological parameters of manufacture of cellular concrete mixture // *Construction Materials and Products*. 2020. Pp. 30–36. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-2-30-36
7. Drozdov A., Osipenkova I., Stupakova O. Dependence of foam concrete properties on technological factors // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. P. 14010. DOI: 10.1051/e3sconf/202016414010
8. Воронов В.В., Глаголев Е.С. Особенности гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих для пенобетонов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2020. Т. 17. № 1 (71). С. 122–135. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135. EDN ZLGTGN.
9. Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Тотурбиева У.Д. Теплоизоляционный пенобетон безавтоклавного твердения из местного нерудного минерального сырья // *Геология и геофизика Юга России*. 2023. Т. 13. № 3. С. 167–177. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013. EDN SSPLSC.
10. Череватова А.В., Жерновская И.В., АLEXIN Д.А., Кожухова М.И., Кожухова Н.И., Яковлев Е.А. Теоретические аспекты создания композиционного наноструктурированного гипсового вяжущего повышенной жаростойкости // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 4. С. 5–13. EDN OJFHQO.
11. Кожухова Н.И. Опыт производства ячеистых бетонов на основе геополимерных вяжущих // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 4. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23. EDN QDVWLI.
12. Хейрбеков Р.А., Самченко С.В. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликатного поризованного арболитового материала // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. № 4. С. 379–390. EDN JKBDQD.
13. Величко Е.Г., Дворников Р.М. Высокоэффективный поризованный арболит на основе шлако-силикатных вяжущих веществ // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 28. № 4. С. 179–189. EDN RZZIVJ.
14. Лукаш Е.В., Кузьменков М.И. Неавтоклавный пенобетон на основе магнезиального цемента // *Строительные материалы*. 2012. № 11. С. 33–35. EDN PJNDYF.
15. Strokova V., Sivalneva M., Kobzev V. The effect of polyvinyl alcohol on the system of cement-free binding alumino-silicate composition // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. Pp. 169–174. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.169
16. Gencel O., Bilir T., Bademler Z., Ozbakkaloglu T. A Detailed Review on Foam Concrete Composites: Ingredients, Properties, and Microstructure // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 11. P. 5752. DOI: 10.3390/app12115752
17. Dvornikov R.M., Velichko E.G. Wood concrete modified with ground granulated blast furnace slag // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. No. 6 (91). P. 9107. DOI: 10.18720/CUBS.91.7. EDN JUIUZM.
18. Priyatham B.P.R.V.S., Lakshmayya M.T.S., Chaitanya D.V.S.R.K. Review on performance and sustainability of foam concrete // *Materials Today : Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.080
19. Hou L., Li J., Lu Z., Niu Y. Influence of foaming agent on cement and foam concrete // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 280. P. 122399. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122399
20. Falliano D., Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 165. Pp. 735–749. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241
21. Дворников Р.М., Самченко С.В. Формирование ячеистой структуры поризованного арболита // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. № 1. С. 82–91. EDN KWNQIT.
22. Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Композиционное вяжущее с минеральными добавками для неавтоклавных пенобетонов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 4. С. 122–131. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d077f65.54773394. EDN ZDDGHJ.
23. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskiy V.V. Diverse particles filler forms influence on mechanical

properties foam concrete mixtures // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. Issue 2. P. 022088. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022088

24. Batool F., Rafi M.M., Bindiganavile V. Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam : a review // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 20. Pp. 696–704. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.09.008

Поступила в редакцию 19 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 27 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Дарья Дмитриевна Нецвет — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и эксплуатации горнометаллургических комплексов; Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (СТИ НИТУ МИСИС); 309516, Белгородская обл. г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42; РИНЦ ID: 685087, Scopus: 55992118000, ResearcherID: L-3354-2016, ORCID: 0000-0002-7292-1154, SPIN-код: 6452-8550; netsvet_dd@mail.ru;

Мариана Николаевна Сивальнева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 685028, Scopus: 57193898450, ResearcherID: K-2030-2016, ORCID: 0000-0002-4957-9207; 549041@mail.ru;

Виктория Викторовна Нелюбова — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИЛ «Самоочищающиеся покрытия» Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 605989, Scopus: 56237522700, ResearcherID: V-2514-2018, ORCID: 0000-0002-5736-5962; nelubova@list.ru;

Валерия Валерьевна Строкова — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой материаловедения и технологии материалов; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com.

Вклад авторов:

Нецвет Д.Д. — концепция исследования, сбор материала, обработка материала.

Сивальнева М.Н. — обработка материала, написание статьи.

Нелюбова В.В. — научное руководство, концепция исследования.

Строкова В.В. — развитие методологии, итоговые выводы, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Elrahman M.A., El Madawy M.E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. *Applied Sciences*. 2019; 9(7):1447. DOI: 10.3390/app9071447
2. Zeng X., Lan X., Zhu H., Liu H., Umar H.A., Xie Y. et al. A review on bubble stability in fresh concrete: Mechanisms and main factors. *Materials*. 2020; 13(8):1820. DOI: 10.3390/MA13081820
3. Zhou G., Su R.K.L. A Review on Durability of Foam Concrete. *Buildings*. 2023; 13(7):1880. DOI: 10.3390/buildings13071880
4. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete : a review. *Construction and Building Materials*. 2015; 101:990-1005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112
5. Morgun L.V., Nemilostiviy A.G., Gebru B.K., Morgun V.N. Evolution of application in construction light

- concrete. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2022; 4(35):21-36. EDN KTFRDJ. (rus.).
6. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Gudov D.V., Shurakov I.M., Korbut E.E. Optimization of receptural-technological parameters of manufacture of cellular concrete mixture. *Construction Materials and Products*. 2020; 30-36. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-2-30-36
7. Drozdov A., Osipenkova I., Stupakova O. Dependence of foam concrete properties on technological factors. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:14010. DOI: 10.1051/e3sconf/202016414010
8. Voronov V.V., Glagolev E.S. Polymineral composite binders for foam concrete: features of hydration and hardening. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):122-135. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135. EDN ZLGTGN. (rus.).
9. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbiev U.D. Heat-insulating foam concrete without autoclave harden-

ing from local non-metal mineral raw. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2023; 13(3):167-177. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013. EDN SSPLSC. (rus.).

10. Cherevatova A.V., Zhernovskaya I.V., Alehin D.A., Kozhukhova M.I., Kozhukhova N.I., Yakovlev E.A. Theoretical aspects of development of composite nanostructured gypsum binder characterized by increased heat resistance. *Construction Materials and Products*. 2019; 2(4):5-13. EDN OJFHQO. (rus.).

11. Kozhuhova N. Background of geopolymers-based cellular concrete production. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023; 4:8-23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23. EDN QDVWLI. (rus.).

12. Kheirbekov R.A., Samchenko S.V. Some physicochemical aspects of the formation of the structure of composite slag-silicate porous wood chip concrete material. *Technique and Technology of Silicates*. 2022; 29(4):379-390. EDN JKBDQD. (rus.).

13. Velichko E.G., Dvornikov R.M. Highly efficient porozed arbolith based on slag silicate bindings. *Technique and Technology of Silicates*. 2021; 28(4):179-189. EDN RZZIVJ. (rus.).

14. Lukash E.V., Kuzmenkov M.I. Non-autoclave foam concrete based on magnesium cement. *Construction Materials*. 2012; 11:33-35. EDN PJNDYF. (rus.).

15. Strokova V., Sivalneva M., Kobzev V. The effect of polyvinyl alcohol on the system of cement-free binding alumino-silicate composition. *Solid State Phenomena*. 2020; 299:169-174. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.169

16. Gencel O., Bilir T., Bademler Z., Ozbakkaloglu T. A Detailed Review on Foam Concrete Composites: Ingredients, Properties, and Microstructure. *Applied Sciences*. 2022; 12(11):5752. DOI: 10.3390/app12115752

17. Dvornikov R.M., Velichko E.G. Wood concrete modified with ground granulated blast furnace

slag. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 6(91):9107. DOI: 10.18720/CUBS.91.7. EDN JUIUZM.

18. Priyatham B.P.R.V.S., Lakshmayya M.T.S., Chaitanya D.V.S.R.K. Review on performance and sustainability of foam concrete. *Materials Today : Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.080

19. Hou L., Li J., Lu Z., Niu Y. Influence of foaming agent on cement and foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 280:122399. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122399

20. Falliano D., Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Construction and Building Materials*. 2018; 165:735-749. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241

21. Dvornikov R.M., Samchenko S.V. Formation of the cellular structure of porous wood concrete. *Technique and Technology of Silicates*. 2022; 29(1):82-91. EDN KWNQIT. (rus.).

22. Necvet D., Nelyubova V., Strokova V. Composite binder with mineral additives for non-autoclave foam concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019; 4:122-131. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d077f65.54773394. EDN ZDDGHJ. (rus.).

23. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskiy V.V. Diverse particles filler forms influence on mechanical properties foam concrete mixtures. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 698(2):022088. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022088

24. Batool F., Rafi M.M., Bindiganavile V. Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam : a review. *Journal of Building Engineering*. 2018; 20:696-704. DOI: 10.1016/j.job.2018.09.008

Received August 19, 2024.

Adopted in revised form on November 14, 2024.

Approved for publication on November 27, 2024.

BIONOTES: **Daria D. Netsvet** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Operation of Mining and Metallurgical Complexes; **Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the National University of Science and Technology “MISIS” (STI NUST MISIS)**; 42 microdistrict Makarenko, Belgorod region, Stary Oskol, 309516, Russian Federation; ID RSCI: 685087, Scopus: 55992118000, ResearcherID: L-3354-2016, ORCID: 0000-0002-7292-1154; netsvet_dd@mail.ru;

Mariana N. Sivalneva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 685028, Scopus: 57193898450, ResearcherID: K-2030-2016, ORCID: 0000-0002-4957-9207; 549041@mail.ru;

Viktoriya V. Nelyubova — Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher at the Research Laboratory “Self-cleaning coatings” of the Innovative Scientific-Educational and Experimental-Industrial Center of Nanostructured Composite Materials (ISE EIC NCM); **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 605989, Scopus: 56237522700, ResearcherID: V-2514-2018, ORCID: 0000-0002-5736-5962; nelubova@list.ru;

Valeria V. Stroкова — Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of Materials Science and Technology of Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com.

Contribution of the authors:

Daria D. Netsvet — conceptualization, data gathering and processing.

Mariana N. Sivalneva — data processing, writing of the article.

Viktoria V. Nelyubova — supervision conceptualization.

Valeria V. Stroкова — development of methodology, final conclusions, scientific editing of the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.54

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.291-305

Термическая стойкость цементных систем с активными минеральными добавками

Наталья Максимовна Толыпина, Шарк Матрасулович Рахимбаев,
Дмитрий Юрьевич Чашин

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Термическая коррозия цементного камня (ЦК) представляет собой серьезную проблему на объектах коммунального хозяйства и других сооружениях, эксплуатируемых в условиях повышенной температуры и влажности. Этот вид коррозии достаточно хорошо исследован специалистами по тампонажным работам, однако слабо изучен в строительном материаловедении. В связи с тем, что технологии тампонажных и строительных работ имеют существенные различия, необходимы дальнейшие исследования в этой области.

Материалы и методы. Для исследований использовали золу уноса Смоленской ГЭС, доменный гранулированный шлак Новолипецкого металлургического комбината в дозировке 30 %, в качестве вяжущего — портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» (ГОСТ 31108–2020). Предел прочности при сжатии и изгибе образцов определяли на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4. Для анализа продуктов гидратации использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9900 Work Station, синхронный термоанализатор STA 449 F1 Jupiter NETZSCH, микроструктуру ЦК изучали с помощью РЭМ Tescan Mira 3.

Результаты. Установлено, что активные минеральные добавки золы и шлака повышают коэффициент термической стойкости ЦК с 0,47 до 0,69 (шлак) и 0,72 (зола) к 12 мес. испытаний. При помощи комплексного применения методов рентгенофазового и дериватографического анализов с электронно-микроскопическими исследованиями выявлены значительные отличия между продуктами гидратации в нормальных и термовлажностных условиях. Структура камня при длительном твердении в термовлажностных условиях имеет сложный и неоднородный характер, наряду с тоберморитовым гелем происходит образование хорошо закристаллизованных гидросиликатов кальция различной основности.

Выводы. Добавление активных минеральных добавок золы и доменного гранулированного шлака способствует повышению термической стойкости ЦК. При повышенной температуре и влажности интенсифицируется образование низкоосновных гидросиликатов, что нивелирует разницу между растворимостью зон срастания и изолированных частиц и тем самым способствует повышению термической устойчивости системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: термическая коррозия, цементный камень, активные минеральные добавки, прочность, микроструктура, фазовый состав

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чашин Д.Ю. Термическая стойкость цементных систем с активными минеральными добавками // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 291–305. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.291-305

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Чашин, dmitriychashin11@gmail.com.

Thermal stability of cement systems with active mineral additives

Natalia M. Tolypina, Shark M. Rakhimbaev, Dmitriy Yu. Chashin

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU); Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Thermal corrosion of cement stone is a serious issue in public utilities and other structures operated under conditions of elevated temperature and humidity. This type of corrosion is thoroughly studied by experts in plug-back work, but it is less researched in construction materials science. Due to the fact that technologies of plugging and construction works have significant differences, further research in this field is necessary.

Materials and methods. The study used fly ash from the Smolensk Hydroelectric Power Station and granulated blast furnace slag from the Novolipetsk Steel Plant in dosage of 30 %. Portland cement CEM I 42.5 N from CJSC "Oskolcement" (GOST 31108–2020) was used as the binder. The compressive and flexural strength of the specimens was determined using a PGM-100MG4 hydraulic press. Hydration products were analyzed using an ARL 9900 Work Station X-ray fluorescence spectrometer, an STA 449 F1 Jupiter NETZSCH synchronous thermal analyzer, and the microstructure of the cement stone was examined using a Tescan Mira 3 scanning electron microscope.

Results. It was found that active mineral additives of fly ash and slag increase the thermal stability coefficient of the cement stone from 0.47 to 0.69 (slag) and 0.72 (fly ash) after 12 months of testing. Significant differences between hydration products under normal and thermal-humid conditions were revealed through the combined use of X-ray phase and derivatographic analysis with electron microscopy studies. The stone structure under prolonged curing in thermal-humid conditions is complex and heterogeneous, with well-crystallized calcium hydrosilicates of varying basicity forming alongside tobermorite gel.

Conclusions. The addition of active mineral additives, such as fly ash and granulated blast furnace slag, contributes to the increased thermal stability of cement stone. Under elevated temperature and humidity, the formation of low-basicity hydrosilicates is intensified, which mitigates the difference between the solubility of the contact zones and isolated particles, thereby enhancing the thermal stability of the system.

KEYWORDS: thermal corrosion, cement stone, active mineral additives, strength, microstructure, phase composition

Acknowledgements. The work was carried out as part of the implementation of the federal university support program "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Tolypina N.M., Rakhimbaev Sh.M., Chashin D.Yu. Thermal stability of cement systems with active mineral additives. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):291-305. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.291-305 (rus.).

Corresponding author: Dmitry Yu. Chashin, dmitrychashin11@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Термическая деструкция наблюдается на объектах коммунального хозяйства и других сооружениях, которые контактируют с горячей водой, в бетонных трубах на портландцементном вяжущем для транспортировки горячей воды, в градирнях тепловых и атомных электростанций и др. [1–5]. Возможной причиной ухудшения несущей способности многоэтажных зданий в прибрежной зоне городов с влажным тропическим климатом также может быть термическая агрессия [6, 7]. Наиболее интенсивно и ярко деструктивные явления под влиянием повышенной температуры и влажности наблюдаются в цементном кольце глубоких нефтяных и газовых скважин, которые омываются пластовыми водами при температуре 80–200 °С и выше [8–11]. Наблюдающуюся при этом деградацию цементного камня (ЦК) предложено называть «термической коррозией»¹.

Еще несколько десятилетий назад специалисты по тампонажным цементам разработали способы эффективной защиты от термической коррозии ЦК. Способ борьбы основан на том, что причиной процесса является разность растворимости изолированных и сросшихся друг с другом гидратных новообразований [12–14]. В этой связи резкое снижение растворимости тех и других, а соответственно и разницы по растворимости между ними, приводит к соответствующему замедлению процессов термической агрессии. Простейший способ реализации такого подхода — добавление к вяжущему активных минеральных добавок (МД) типа молотого

кварцевого песка, доменного гранулированного шлака, золы уноса ТЭС и т.п. [15–18]. Исключение составляют пуццолановые добавки типа трепела, опоки и т.д., которые образуют в ЦК гидросиликаты с высокой растворимостью в воде. Снижение основности гидросиликатов кальция (ГСК) с 2 до 1–0,8 ведет к уменьшению их растворимости, что потенциально может улучшить термостойкость камня. Однако уменьшение основности до 1,8 не дает достаточно-го снижения растворимости, так как образующиеся двухосновные ГСК остаются слишком растворимыми и способны к кристаллизации [19, 20]. Минимальная доля добавки должна составлять 20–30 %, чтобы обеспечить основность ГСК, близкую к 1.

Термическая коррозия хорошо изучена специалистами по тампонажным работам, но этому виду физической коррозии не уделялось должное внимание специалистами в строительном материаловедении. Необходимы дальнейшие исследования, так как существуют отличия тампонажных и строительных технологий. Цель работы — исследование влияния активных МД золы уноса и доменного гранулированного шлака на термическую стойкость ЦК при длительном твердении в условиях повышенной температуры и влажности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве активных МД к цементу использовали золу Смоленской ГЭС и доменный гранулированный шлак Новолипецкого металлургического комбината в дозировке 30 % (табл. 1, 2).

Основными компонентами золы являются аморфные SiO₂ и Al₂O₃ с кристаллическими включениями кварца (SiO₂), магнетита (Fe₃O₄), муллита

¹ Рахимбаев Ш.М. Регулирование технических свойств тампонажных растворов. Ташкент : Фан, 1976. 160 с.

Табл. 1. Химический состав золы Смоленской ГЭС

Table 1. Chemical composition of the ash from the Smolensk hydroelectric power station

Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	SO ₃	TiO ₂	ппп / loi
9,18	19,60	7,41	58,30	1,14	0,05	0,74	0,12	0,61	0,8	1,82

Табл. 2. Химический состав доменного гранулированного шлака АО «Новолипецкий металлургический комбинат»
Table 2. Chemical composition of granulated blast furnace slag from Novolipetsk steel plant

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	MnO ₂	TiO ₂
40,08	7,5	0,51	41,66	9,35	0,45	0,63	0,45

(Al₆Si₂O₁₃). Доменный гранулированный шлак относится к мелилитовой группе и обладает главным образом стекловидной структурой, включает слабо закристаллизованный волластонит (Ca₃(Si₃O₉)) и мелилит (Ca₂(Al, Mg, Si)Si₂O₇), модуль основности $M_o = 1,07$. Зола применяли в натуральном виде ($S_{уд} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$), доменный гранулированный шлак измельчали в лабораторной мельнице до $S_{уд} = 3800 \text{ см}^2/\text{г}$. В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (ГОСТ 31108–2020) ЗАО «Осколцемент» ($C_3S = 61,59 \%$, $C_2S = 14 \%$, $C_3A = 6,83 \%$, $C_4AF = 13,73 \%$; НГ = 26 %; начало схватывания 230 мин, активность 56,2 МПа). Изготавливали образцы размером $2,5 \times 2,5 \times 10 \text{ см}$ из теста нормальной густоты НГ = 26,5 % (ПЦ:зола = 70:30), НГ = 26,7 % (ПЦ:шлак = 70:30), НГ = 26,0 % (ПЦ = 100). Твердение образцов проходило в нормальных (20 °С) и термовлажностных условиях (80 °С) в лабораторной водяной бане LOIP LB-163. Предел прочности образцов при изгибе и сжатии определяли после 1, 3, 6 и 12 мес. твердения на лабораторном прессе ПГМ-100МГ4.

Для анализа гидратационных продуктов ЦК применялся рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9900 Work Station, синхронный термоанализатор STA 449 F1 Jupiter NETZSCH, который включает термогравиметрию (ТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК). Микроструктуру ЦК с активными минеральными добавками (АМД) исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Mira 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты периодических определений предела прочности образцов при изгибе и сжатии после 1, 3, 6 и 12 мес. твердения приведены на рис. 1. У образцов, твердевших в нормальных условиях (20 °С), наблюдался устойчивый рост прочности как при сжатии, так и при изгибе в течение первых трех месяцев, после чего темп набора прочности замедлился. После 6 мес. твердения набор прочности у шлакоцементных и чисто цементных образцов стабилизировался, у образцов с добавкой золы отмечался рост прочности. Твердение образцов с добавкой золы в термовлажностных условиях (80 °С) характеризовалось наибольшей стабильностью. Образцы из чистого ЦК показали наименьшую прочность и постепенное снижение после 3 мес., что вызвано интенсификацией деструктивных напряжений в ЦК. У шлакоцементных образцов прочность при сжатии заметно снизилась к 12 мес. твердения. Набор прочности при изгибе образцов в нормальных условиях проходил

практически синхронно, независимо от вида АМД. В условиях повышенной температуры 80 °С добавка шлака обеспечила некоторое преимущество шлакоцементных образцов по прочности на изгиб.

Коэффициент термической стойкости рассчитывали как отношение предела прочности при сжатии образцов, твердевших в воде при температуре 80 °С, к пределу прочности образцов при сжатии, твердевших при температуре 20 °С: $K_{терм.ст}^{80} = R_{сж}^{80} / R_{сж}^{20}$. Коэффициент термической стойкости (12 мес.) у золоцементного камня составил $K_{терм.ст}^{12} = 0,72$, у шлакоцементного камня $K_{терм.ст}^{12} = 0,69$, у чистого цементного камня $K_{терм.ст}^{12} = 0,47$, что свидетельствует о значительном влиянии золы и шлака на термическую стойкость ЦК в данном интервале времени.

Особенности процессов фазообразования в ЦК с АМД в нормальных условиях и при повышенной температуре исследовали при помощи рентгенофазового анализа через 12 мес. твердения образцов (рис. 2, 3). Рентгенограммы исследованных проб свидетельствуют о том, что у образцов обоих составов при температуре 80 °С по сравнению с образцами нормального твердения (20 °С) заметно уменьшается интенсивность дифракционных максимумов, характерных для Ca(OH)₂ ($d = 4,93; 2,63; 1,93 \dots \text{Å}$), при этом в шлакоцементном камне диагностируется свободный гидроксид кальция, в то время как в золоцементном камне он практически отсутствует (рис. 2, b; 3, b). Минимальное содержание Ca(OH)₂ у образцов золоцементного состава при твердении в горячей воде свидетельствует о связывании значительной части извести в более термически устойчивые низкоосновные гидросиликаты кальция, соответственно, основность гидратов, образующихся при твердении ЦК состава ПЦ + зола, особенно гидросиликатов, будет ниже, чем содержащихся в камне на основе ПЦ + шлак.

В образцах золоцементного камня термовлажностного твердения (80 °С) диагностированы преимущественно низкоосновные гидросиликаты кальция типа CSH(B), возможно образование гидросиликатов типа гиrolита C₂S₃H₂ и афвиллита C₃S₂H₃ (рис. 2). В золоцементном камне нормального твердения (20 °С) присутствует высокоосновный гидросиликат кальция C₂SH₂ (рис. 2), что подтверждается присутствием характерных для Ca(OH)₂ пиков ($d = 4,917; 2,632 \dots \text{Å}$) и их интенсивностью на рентгенограмме, так как наличие портландита в ЦК является условием присутствия ГСК высокой основности, состав которых выражается формулой C₂SH₂.

Наибольшее количество Ca(OH)₂ наблюдается у шлакоцементных образцов, хранившихся в воде в нормальных условиях. На рентгенограмме (рис. 3, a)

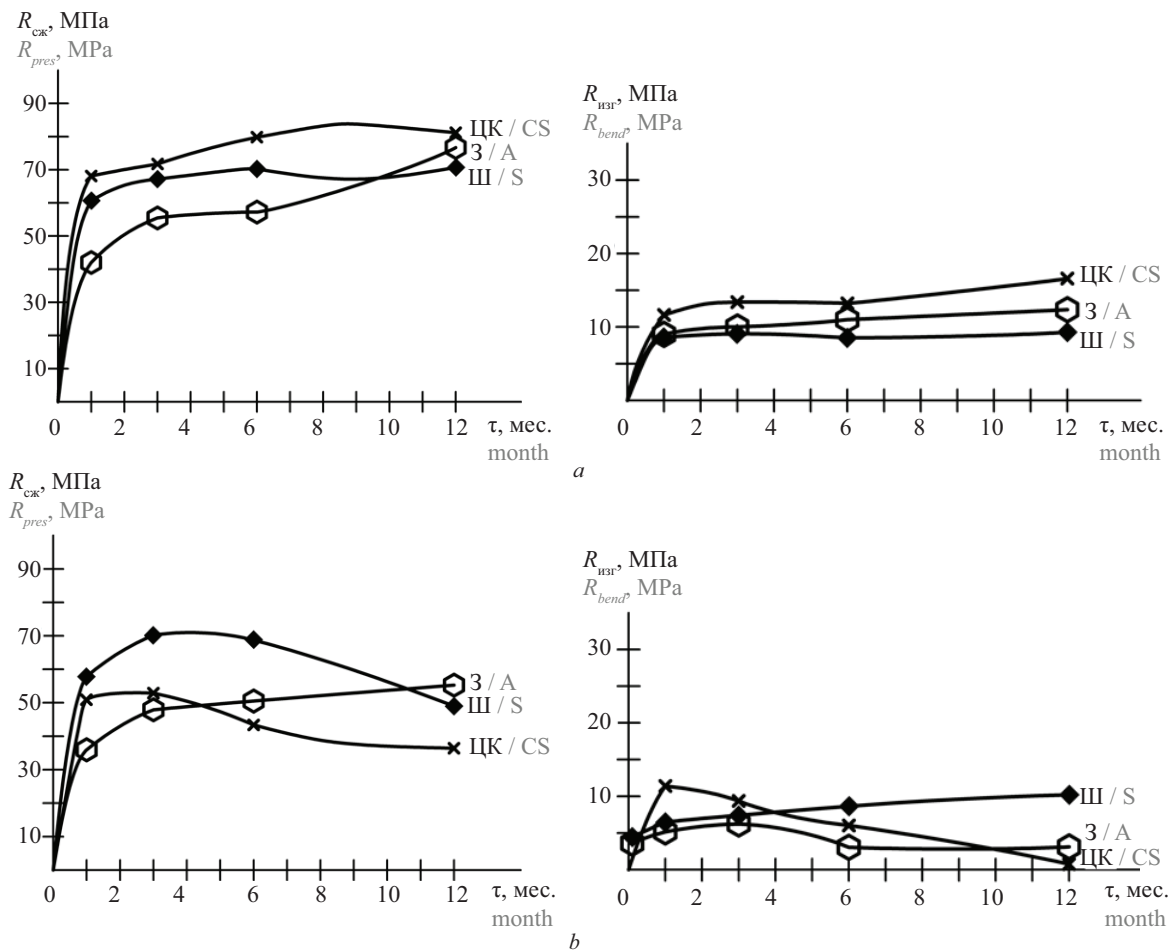
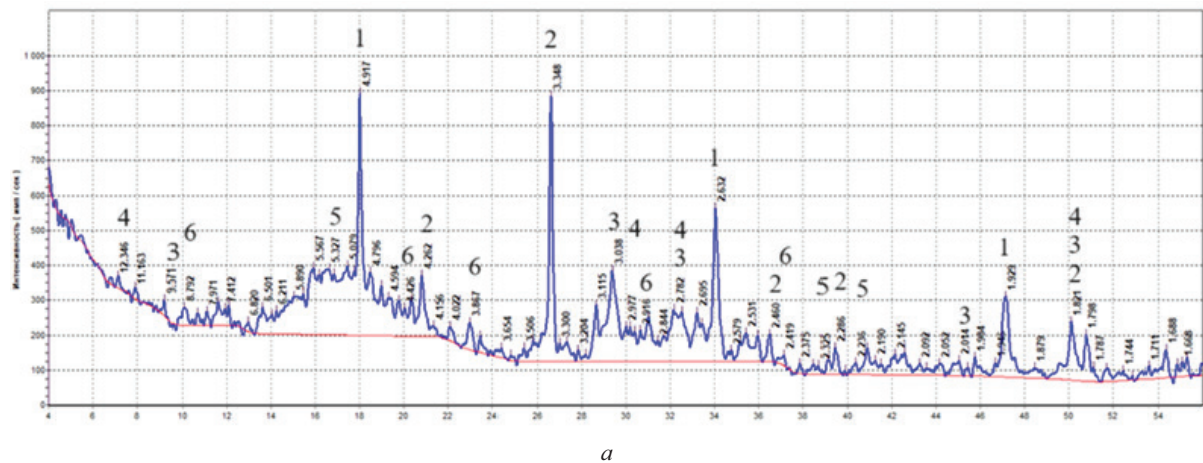


Рис. 1. Изменение предела прочности образцов при изгибе и сжатии, твердевших в различных термовлажностных условиях: а — при 20 °С; б — при 80 °С; ЦК — цементный камень; 3 — ПЦ:зола = 70:30; Ш — ПЦ:шлак = 70:30

Fig. 1. Changes in the strength limit of specimens during bending and compression, cured under various thermal-humid conditions: а — at 20 °C; б — at 80 °C; CS — cement stone; A — PC:ash = 70:30; S — PC:slag = 70:30

зафиксировано присутствие основных гидратных фаз: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d = 4,93; 2,63; 1,93 \dots \text{\AA}$), $\text{CSH}(\text{B})$ ($d = 12,5; 3,07; 2,8; 1,83 \dots \text{\AA}$), C_2SH_2 ($d = 9,8; 3,03; 2,8 \dots \text{\AA}$), C_3AH_6 ($d = 5,14; 2,30; 2,23; 2,04 \dots \text{\AA}$), $\text{C}_3\text{AS}\cdot\text{H}_{12}$ ($d = 8,92; 4,46; 3,99; 2,87; 2,28 \dots \text{\AA}$). Минералы шлака не обнаружены, что является результатом либо

совпадения дифракционных максимумов клинкера и шлака, либо следствием стекловидного состояния шлаков (слабая интенсивность дифракционных максимумов). В термовлажностных условиях твердения (рис. 3, б) у шлакоцементного камня через 12 мес. появляются дифракционные максимумы, соответству-



а

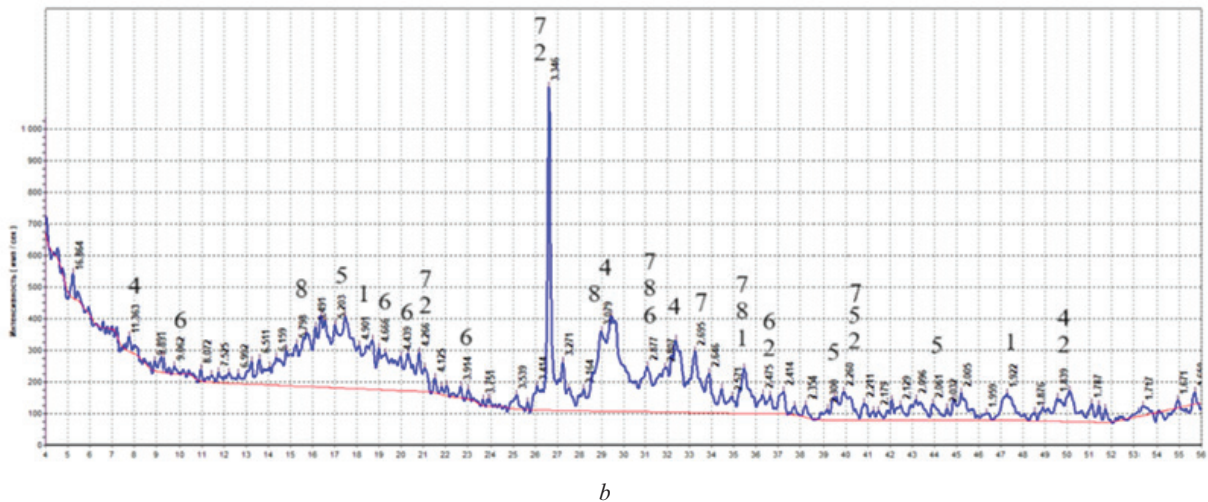


Рис. 2. Рентгенограмма золоцементного камня, твердевшего при температуре 20 °C (a) и 80 °C (b): 1 — Ca(OH)_2 ($d = 4,93; 2,63; 1,93; 1,79 \dots \text{\AA}$); 2 — SiO_2 ($d = 4,24; 3,34; 2,45; 2,28; 1,81 \dots \text{\AA}$); 3 — C_2SH_2 ($d = 9,8; 3,07; 2,80; 2,00; 1,83 \dots \text{\AA}$); 4 — CSH(B) ($d = 12,5; 3,07; 2,80; 1,83 \dots \text{\AA}$); 5 — C_3AH_6 ($d = 5,14; 2,30; 2,23; 2,04 \dots \text{\AA}$); 6 — $\text{C}_3\text{ASiH}_{12}$ ($d = 8,92; 4,46; 3,99; 2,87; 2,45 \dots \text{\AA}$); 7 — $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$ ($d = 4,24; 3,36; 2,85; 2,65; 2,25 \dots \text{\AA}$); 8 — $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ($d = 5,74; 4,73; 3,19; 2,84; 2,74; 2,145 \dots \text{\AA}$)

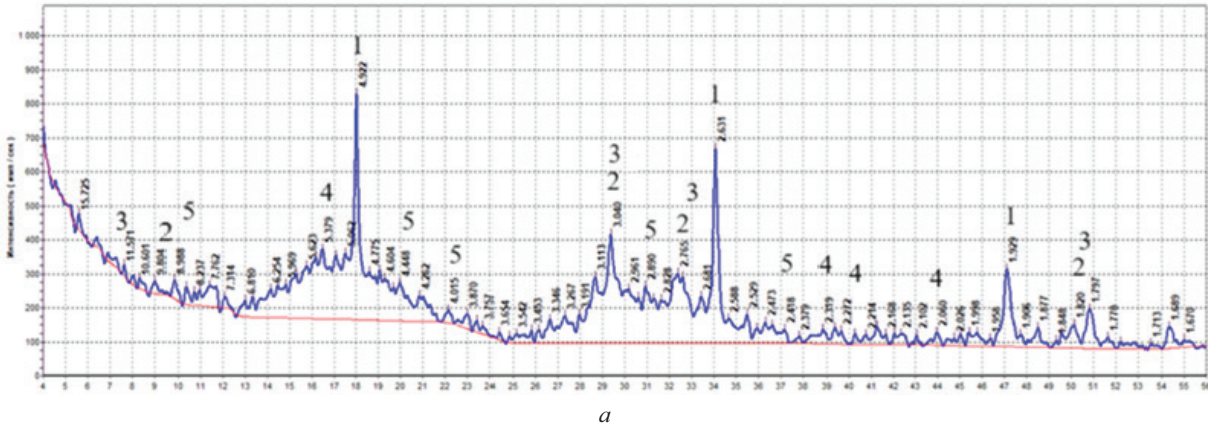
Fig. 2. X-ray image of ash-cement stone hardened at a temperature of 20 °C (a) and 80 °C (b): 1 — Ca(OH)_2 ($d = 4.93; 2.63; 1.93; 1.79 \dots \text{\AA}$); 2 — SiO_2 ($d = 4.24; 3.34; 2.45; 2.28; 1.81 \dots \text{\AA}$); 3 — C_2SH_2 ($d = 9.8; 3.07; 2.80; 2.00; 1.83 \dots \text{\AA}$); 4 — CSH(B) ($d = 12.5; 3.07; 2.80; 1.83 \dots \text{\AA}$); 5 — C_3AH_6 ($d = 5.14; 2.30; 2.23; 2.04 \dots \text{\AA}$); 6 — $\text{C}_3\text{ASiH}_{12}$ ($d = 8.92; 4.46; 3.99; 2.87; 2.45 \dots \text{\AA}$); 7 — $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$ ($d = 4.24; 3.36; 2.85; 2.65; 2.25 \dots \text{\AA}$); 8 — $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ($d = 5.74; 4.73; 3.19; 2.84; 2.74; 2.145 \dots \text{\AA}$)

ющие α-гидрату двухкальциевого силиката $\text{C}_2\text{SH(A)}$ ($d = 4,22; 3,9; 3,54; 3,27 \dots \text{\AA}$).

С использованием современного метода дериватографического анализа и сравнительного анализа термоэффектов на кривых нагревания выявлены изменения фазового состава в зависимости от вида АМД и термовлажностных условий твердения. Результаты исследований приведены на рис. 4.

Для золо- и шлакоцементных образцов нормального твердения (20 °C) наблюдается схожесть термических эффектов (рис. 4, 5). Двойной эндотермический эффект образцов нормального твердения при 90–160 °C относится к выделению свободной воды и дегидратации высокоосновных продуктов C-S-H, C-A-H и C-A-S-H, а эндотермические эффекты при 453,7 и 457,4 °C свидетельствуют о присутствии портландита и незавершенности пуццолановых

реакций (рис. 4, 5). Более выраженный эндозффект при 457,4 °C в шлакоцементном камне через 12 мес. твердения подтверждает малую активность доменного гранулированного шлака, уступающего по активности золе. Слабовыраженные эндозффекты при 400 °C у образцов обоих составов при нормальной температуре твердения связаны с обезвоживанием гелеобразных веществ, сопровождающимся уплотнением массы (рис. 4, 5). Эндотермические остановки в интервале 640–750 °C всех режимов твердения, независимо от применяемой АМД, связаны с дегидратацией ГСК различного состава. Возможно наложение в этом интервале температур (640–750 °C) эндозффекта, связанного с диссоциацией тонкодисперсного карбоната кальция CaCO_3 , образующегося за счет частичной карбонизации портландита. Экзотермические эффекты в области 870–900 °C относят-



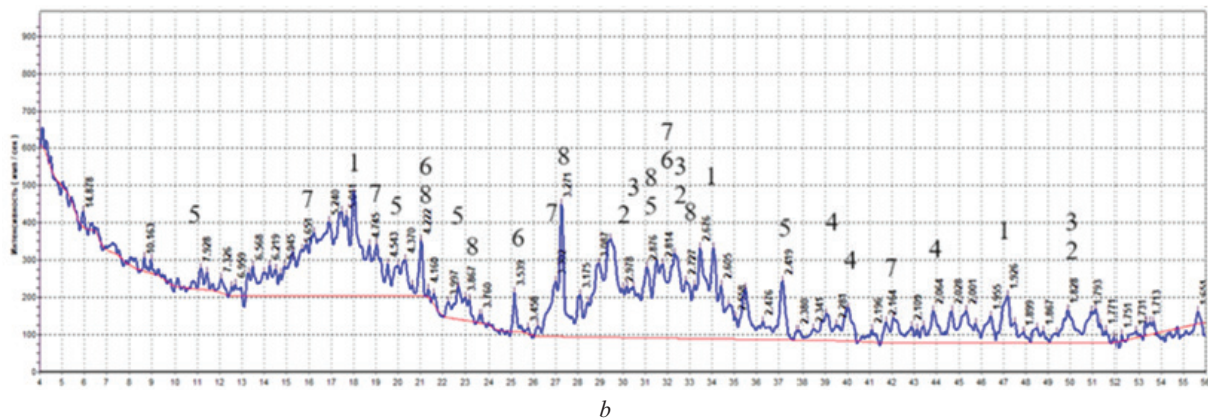


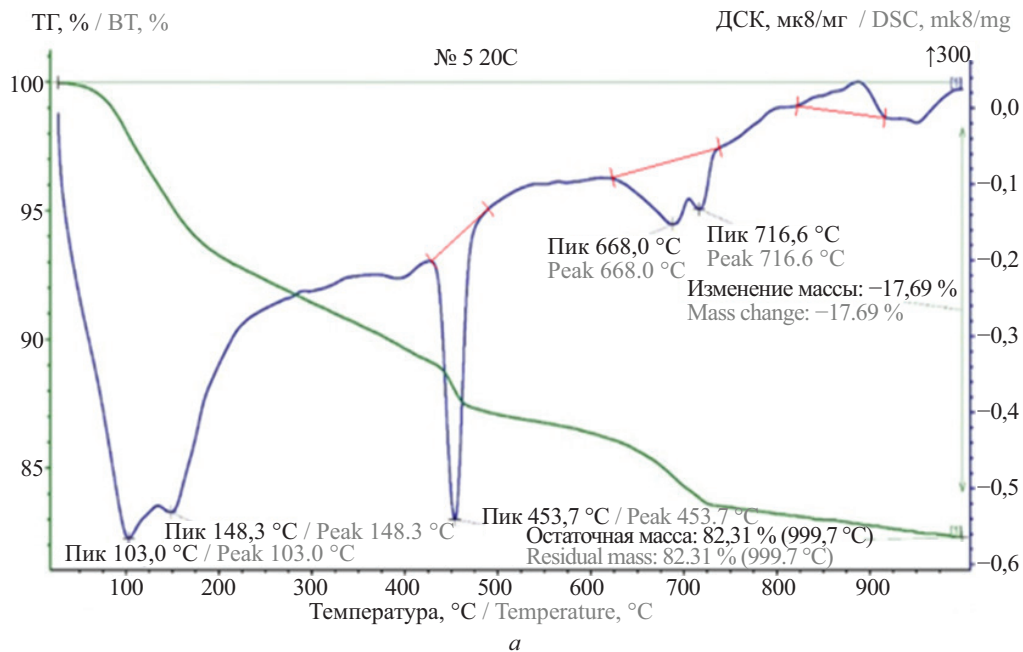
Рис. 3. Рентгенограмма шлакоцементного камня, твердевшего при температуре 20 °С (а) и 80 °С (b): 1 — $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d = 4,93; 2,63; 1,93; 1,79 \dots \text{\AA}$); 2 — C_2SH_2 ($d = 9,8; 3,07; 2,80; 2,00; 1,83 \dots \text{\AA}$); 3 — $\text{CSH}(\text{B})$ ($d = 12,5; 3,07; 2,80; 1,83 \dots \text{\AA}$); 4 — C_3AH_6 ($d = 5,14; 2,30; 2,23; 2,04 \dots \text{\AA}$); 5 — $\text{C}_3\text{AS}\cdot\text{H}_{12}$ ($d = 8,92; 4,46; 3,99; 2,87; 2,45 \dots \text{\AA}$); 6 — $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$ ($d = 4,24; 3,36; 2,85; 2,65; 2,25 \dots \text{\AA}$); 7 — $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ($d = 5,74; 4,73; 3,19; 2,84; 2,74; 2,145 \dots \text{\AA}$); 8 — $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ ($d = 4,22; 3,9; 3,54; 3,27; 2,87; 2,8 \dots \text{\AA}$)

Fig. 3. X-ray image of slag-cement stone hardened at a temperature of 20 °C (a) and 80 °C (b): 1 — $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d = 4.93; 2.63; 1.93; 1.79 \dots \text{\AA}$); 2 — C_2SH_2 ($d = 9.8; 3.07; 2.80; 2.00; 1.83 \dots \text{\AA}$); 3 — $\text{CSH}(\text{B})$ ($d = 12.5; 3.07; 2.80; 1.83 \dots \text{\AA}$); 4 — C_3AH_6 ($d = 5.14; 2.30; 2.23; 2.04 \dots \text{\AA}$); 5 — $\text{C}_3\text{AS}\cdot\text{H}_{12}$ ($d = 8.92; 4.46; 3.99; 2.87; 2.45 \dots \text{\AA}$); 6 — $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$ ($d = 4.24; 3.36; 2.85; 2.65; 2.25 \dots \text{\AA}$); 7 — $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ($d = 5.74; 4.73; 3.19; 2.84; 2.74; 2.145 \dots \text{\AA}$); 8 — $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ ($d = 4.22; 3.9; 3.54; 3.27; 2.87; 2.8 \dots \text{\AA}$)

ся к перестройке кристаллической решетки низкоосновных ГСК.

На кривой нагревания золоцементных образцов термовлажностного твердения (80 °С) отмечается расширение эндотермического эффекта 90–180 °С, что обусловлено присутствием большого количества гелевой фазы типа $\text{CSH}(\text{B})$ (рис. 4). Эта особенность хорошо согласуется со слабовыраженным эндотермическим эффектом 464 °С, характерным для портландита, что свидетельствует о практически полном связывании извести в низкоосновные гидросиликаты кальция. Эндотермический эффект при 729,1 °С характерен для низко-

основных гидросиликатов; эндотермический эффект, характерный для $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ при 420 °С, на кривой нагревания практически не фиксируется. Эндотермические остановки, связанные с декарбонизацией при 650–750 °С, дают наложение с термическими эффектами, отображающими образование гидросиликатов различного состава. Экзотермический эффект при 880–900 °С достигает максимальной величины у золоцементных образцов термовлажностного твердения, связанных с перекристаллизацией низкоосновных ГСК в воластонит.



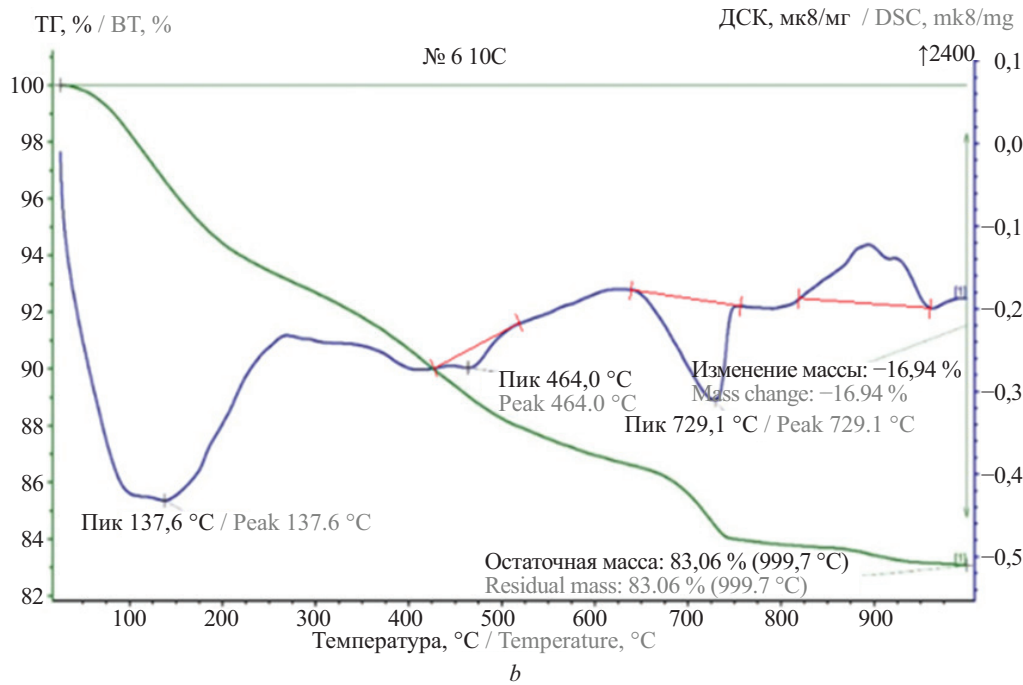
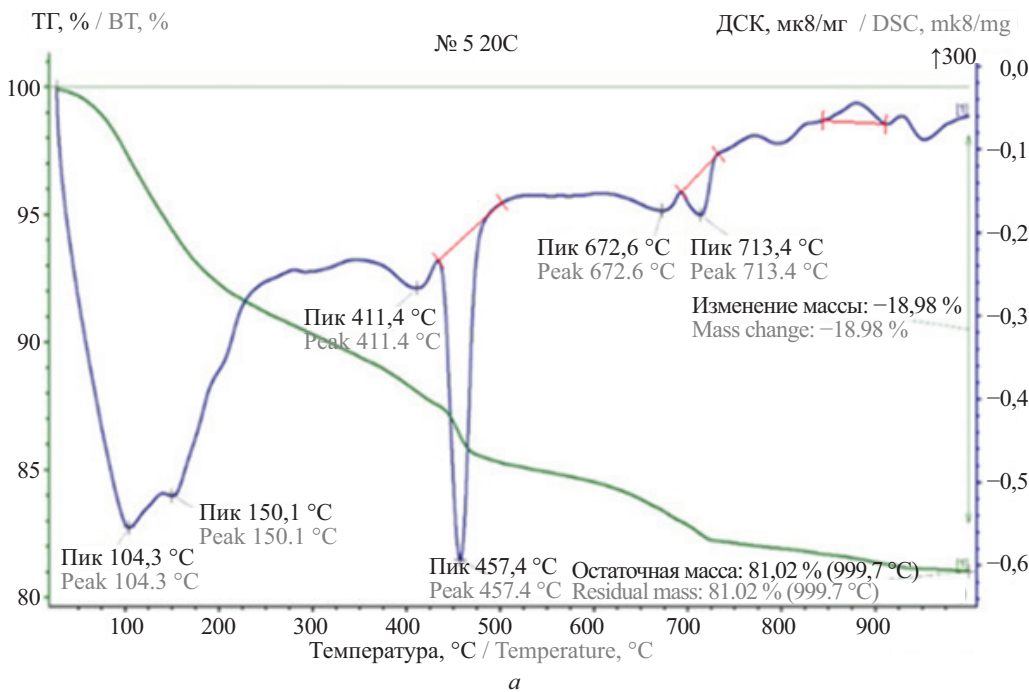


Рис. 4. Термограмма золоцементных образцов, твердевших 12 мес. при температуре 20 °C (a) и 80 °C (b)
Fig. 4. Thermogram of ash-cement specimens hardened for 12 months at a temperature of 20 °C (a) and 80 °C (b)

У шлакоцементных образцов термовлажностного твердения (80 °C) первый двойной эндотермический эффект в интервале 90–220 °C отличается большей площадью по сравнению с образцами нормального твердения в связи с увеличением гелеобразных компонентов ЦК (рис. 5). Наблюдается значительное уменьшение эндотермического эффекта 466,7 °C, характеризующего разложение портландита, что свидетельствует о связывании извести в гидратные фазы низкой основности. Усиливается

эндоэффект при 700–740 °C, что может быть связано с обезвоживанием гидросиликатов. Эндоэффект при 412,1 °C слабо идентифицируется на кривой нагрева, что свидетельствует об ограниченном образовании $C_2SH(A)$. Таким образом, сравнительный анализ термоэффектов на кривых нагрева позволил установить схожесть термограмм золоцементного и шлакоцементного камня нормального твердения (20 °C), которые отличаются в основном количественным от-



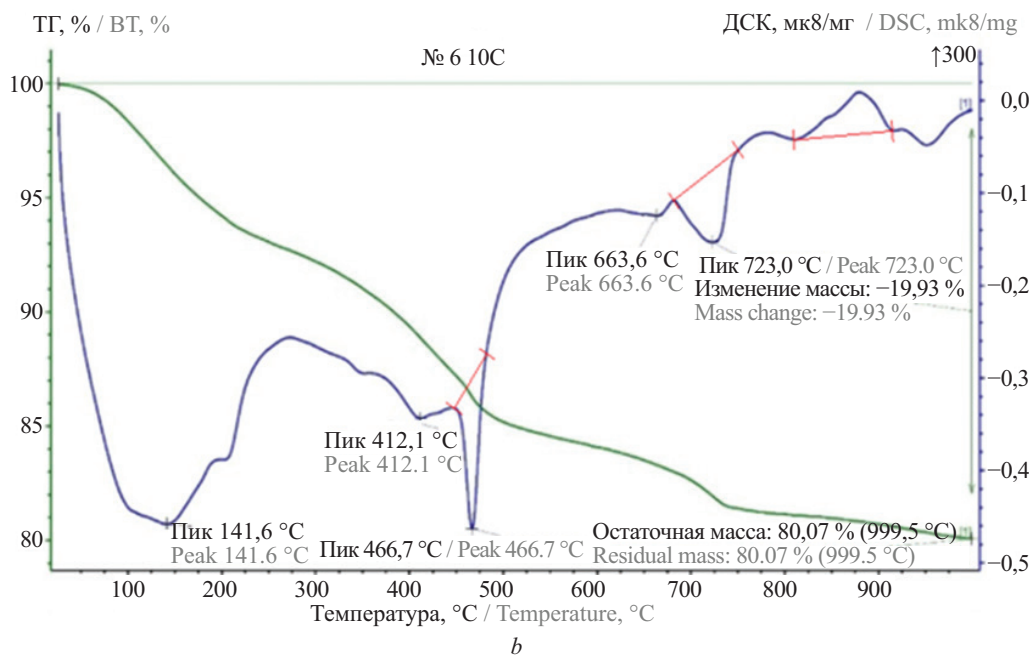


Рис. 5. Термограмма шлакоцементных образцов, твердевших 12 мес. при температуре 20 °C (a) и 80 °C (b)

Fig. 5. Thermogram of slag-cement specimens hardened for 12 months at a temperature of 20 °C (a) and 80 °C (b)

ношением новообразований. Из анализа термограмм образцов длительного тепловлажностного твердения (80 °C) следует вывод о более высокой активности золы, практически полном связывании извести золой к 12 мес. в новые низкоосновные гидратные фазы по сравнению со шлаком. В продуктах гидратации золоцементных образцов слабо прослеживается наличие $\text{Ca}(\text{OH})_2$, содержится максимальное количество CSH(B)-фазы по сравнению со шлакоцементными образцами. Активное взаимодействие аморфного кремнезема золы с известью приводит к интенсивному образованию низкоосновных ГСК типа CSH(B), обладающих пониженной растворимостью и большей термодинамической устойчивостью при повышенной температуре.

Академик П.А. Ребиндер утверждал, что ЦК является термодинамически неустойчивой системой, состоящей из гидратированных новообразований, часть которых срастается между собой, образуя монолитное тело, а небольшая часть находится в свободном изолированном состоянии. Зоны срастания гидратированных частиц имеют несовершенную структуру и отличаются повышенной растворимостью по сравнению с новообразованиями, которые находятся в более или менее изолированном состоянии. Это приводит к тому, что с течением времени зоны срастания, имеющие избыточный термодинамический потенциал и повышенную растворимость по сравнению с изолированными, начинают растворяться, а изолированные частицы увеличиваться в размере. Движущей силой процесса является разность растворимости изолированных частиц и сросшихся, что ведет к тому, что ЦК вначале набирает механическую прочность до тех пор, пока не произойдет полная гидратация

компонентов ЦК, только после этого начинаются указанные выше процессы. Вначале наблюдается снижение механической прочности камня и повышение его общей и открытой пористости, в конце концов ЦК превращается в порошок. Эти явления происходят достаточно долго и поэтому не угрожают цементным системам, находящимся в сухой среде, так как процессы растворения продуктов гидратации вяжущих идут крайне медленно.

Образование низкоосновных гидросиликатов в ЦК с АМД золы и шлака оказывает благоприятное влияние на снижение разницы между растворимостью зон срастания и изолированных частиц, что служит значимым положительным фактором для улучшения термической устойчивости системы.

Комплексное использование методов рентгенофазового и дериватографического анализов с электронно-микроскопическими исследованиями позволило успешно осуществлять анализ кристаллической структуры ЦК с АМД с идентификацией составляющих образований. На рис. 6 приведены электронные микрофотографии образцов цемент:зола = 70:30, выдержанных в течение 12 мес. в воде при 20 и 80 °C. На рис. 6, a показана морфология продуктов гидратации при твердении в воде при 20 °C, на рис. 6, b, c — при 80 °C. Полученные данные электронной микроскопии показывают, что происходят значительные изменения состава геля в термовлажностных условиях (80 °C) в ЦК с золой: повышается соотношение между количеством кристаллических продуктов гидратации и геля и, кроме того, увеличиваются размеры кристаллов (рис. 6). Отмечается формирование более грубодисперсной структуры камня за счет укрупнения частиц новообразований.

Наблюдаются массивы скоплений кристаллов пластинчатой и чешуйчатой формы, а также кристаллов призматической и таблитчатой формы, что характерно для гидросиликатов типа гиrolита и афвиллита (рис. 6, *b, c*). При этом у камня аналогичного состава нормального твердения обнаруживается уплотненная микроструктура, которая склеивает частицы в прочную матрицу (рис. 6, *a*).

Анализ элементного состава на участке скопления тонких пластинчатых и листоватых кристаллов ГСК одного габитуса (рис. 7, поз. 21) и на участке с агрегатами гидросиликатного геля с неровным рельефом поверхности излома (рис. 7, поз. 23) позволил их идентифицировать как гидросиликаты кальция.

Структура камня исследуемых золоцементных образцов при длительном твердении в воде при 80 °С имеет сложный и весьма неоднородный характер. Электронно-микроскопическим методом выявлены гнездообразные скопления крупных призматических кристаллов в порах размером 2–3 мкм (рис. 7), элементный состав этих кристаллов (рис. 7, поз. 12), так же, как и окружающего их геля (рис. 7, поз. 14), позволяет отождествлять их с гидросиликатами кальция.

При большем увеличении (рис. 8) четко видны беспорядочно расположенные, хорошо ограненные удлиненные крупные кристаллы гидросиликата, окруженные тоберморитовым гелем, что подтверждается данными элементного состава.

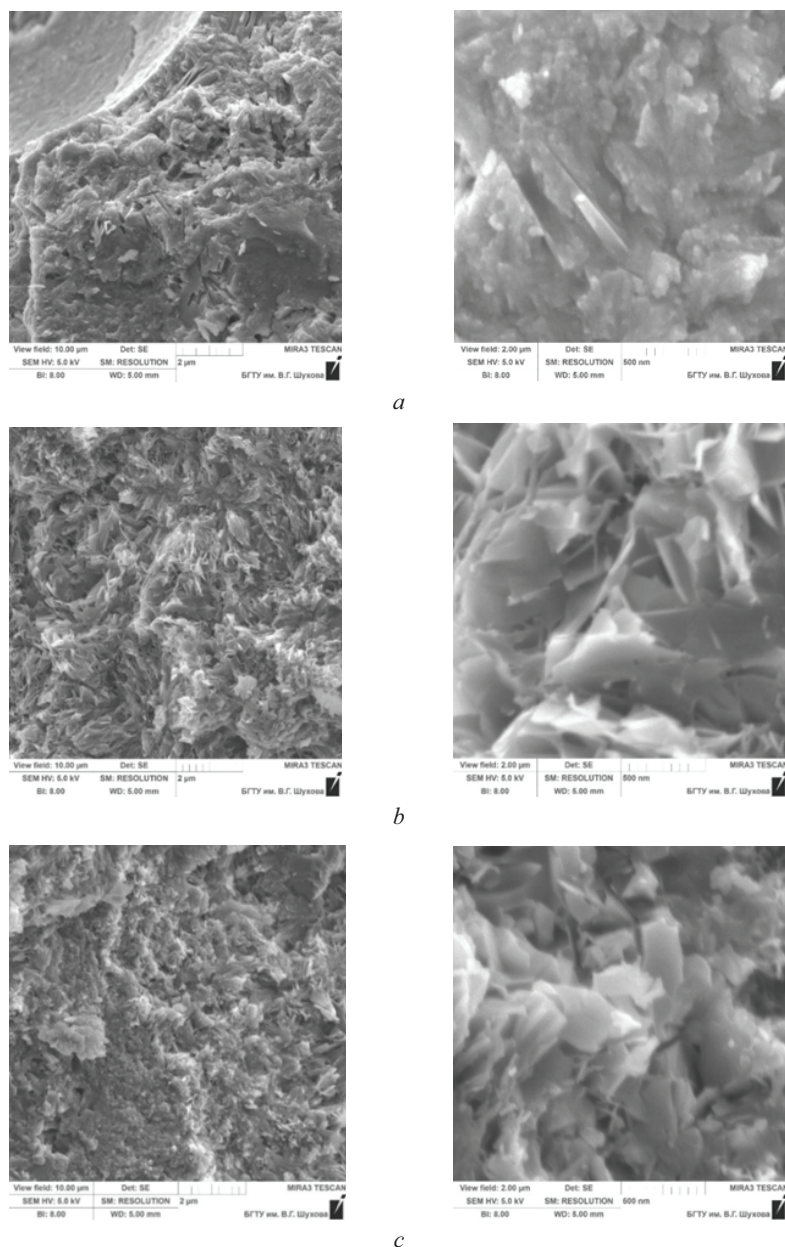


Рис. 6. Микроструктура золоцементного камня, 12 мес.: *a* — CSH-гель (20 °С); *b* — пластинчатые и чешуйчатые кристаллы ГСК (80 °С); *c* — призматические и таблитчатые кристаллы ГСК (80 °С)

Fig. 6. Microstructure of ash-cement stone, 12 months: *a* — CSH gel (20 °C); *b* — plate-like and scaly crystals of CSH (80 °C); *c* — prismatic crystals of CSH (80 °C)

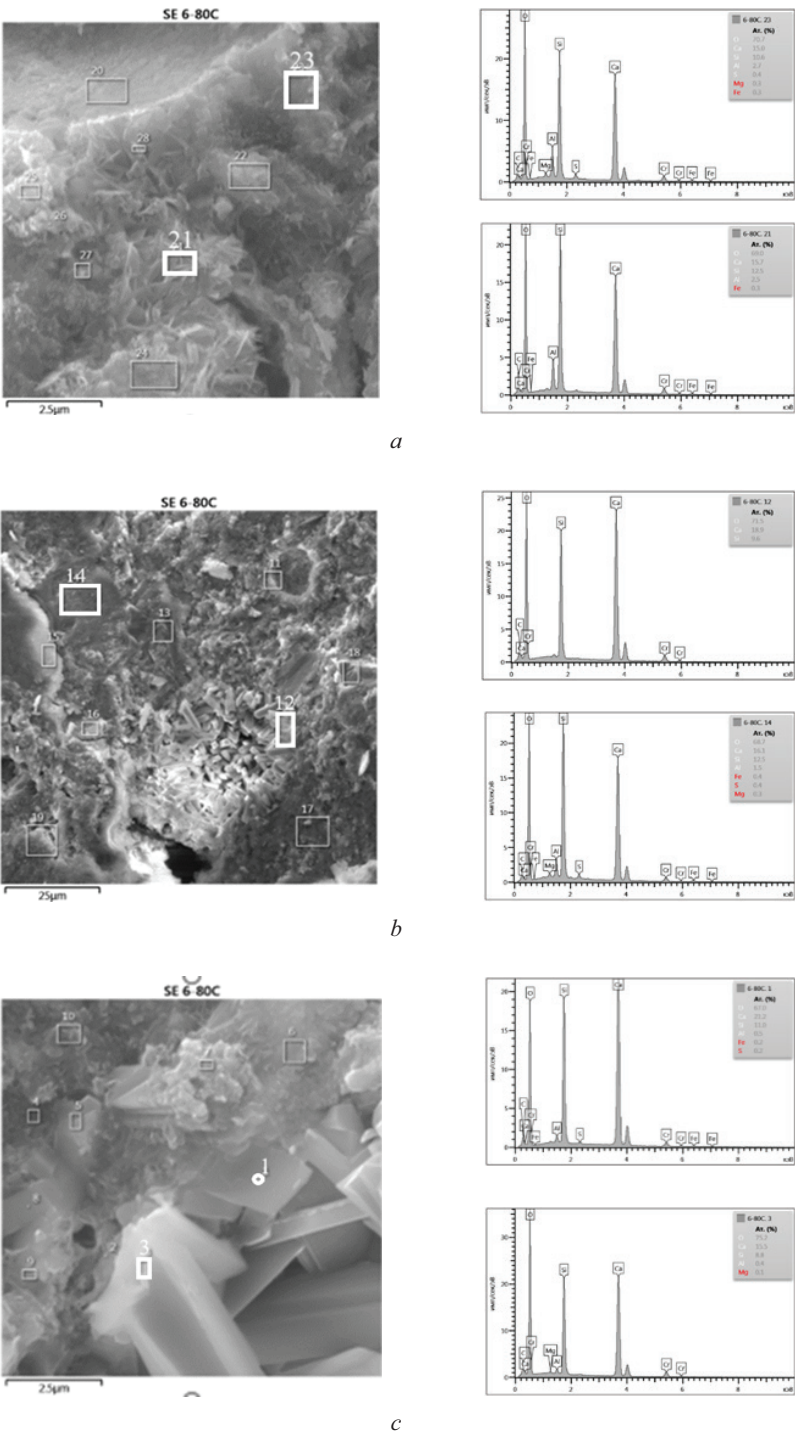


Рис. 7. Микроструктура золоцементного камня термовлажностного твердения; гидросиликаты, 12 мес.
Fig. 7. Microstructure of ash-cement stone cured under thermal-humidity conditions; hydrosilicates, 12 months

Различие микроструктур ЦК с тонкодисперсным доменным гранулированным шлаком, твердевшим в разных температурно-влажностных условиях, выражено сильнее по сравнению с золоцементным камнем (рис. 9). Разница заключается в значительном изменении фазового состава и дисперсности гидратных новообразований в зависимости от температуры твердения. Твердение в нормальных условиях обуславливает более однородную микроструктуру

шлакоцементного камня, а в термовлажностных условиях сильнее выражена неравномерность распределения продуктов гидратации, размеры частиц и их морфология (рис. 9).
Электронно-микроскопическим методом обнаружены скопления крупных призматических кристаллов ГСК одного габитуса, предположительно $C_2SH(A)$ (рис. 9). Кристаллизация крупных частиц гидратов, сопровождающаяся сокращением числа

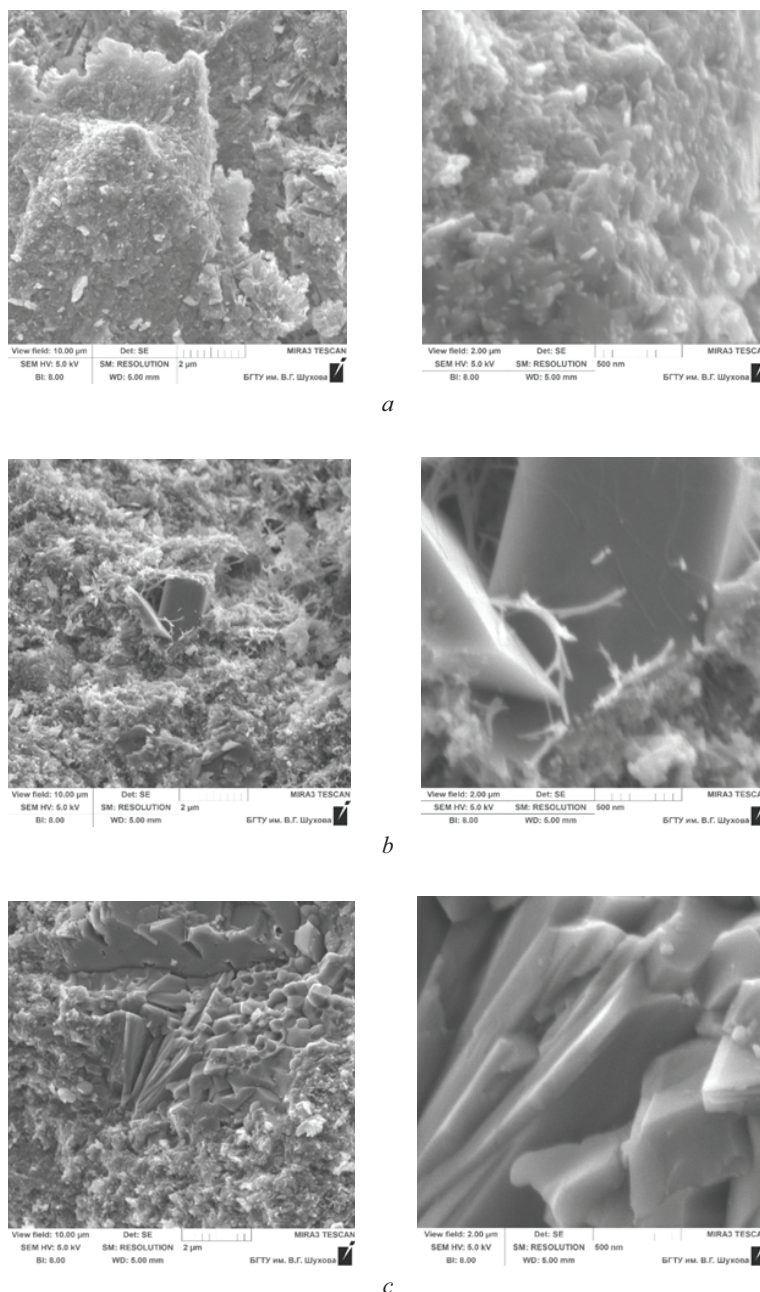


Рис. 8. Микроструктура шлакоцементного камня, 12 мес.: *a* — CSH-гель (20 °C); *b, c* — крупнокристаллические гидросиликаты (80 °C)

Fig. 8. Microstructure of slag-cement stone, 12 months: *a* — CSH-gel (20 °C); *b, c* — large-crystal hydrosilicates (80 °C)

контактов срастания, приводит к ухудшению сцепления кристаллов между собой и с другими элементами ЦК, а также к появлению внутренних растягивающих напряжений, вызванных кристаллизационным давлением растущих кристаллов, что вызывает ослабление структуры.

Таким образом, отличие продуктов гидратации цемента с АМД при термовлажностных условиях от продуктов гидратации при обычных температурах заключается в том, что при повышенной температуре, помимо тоберморитового геля, наблюдается образование некоторого количества хорошо закристаллизованных гидросиликатов кальция с различным

соотношением CaO/SiO_2 и $\text{H}_2\text{O/SiO}_2$. Образование низкоосновных гидратных новообразований в ЦК с АМД вызывает замедление трансформации структуры из-за рекристаллизации и укрупнения частиц, сопровождающейся ослаблением связей между отдельными кристаллами по сравнению с чистым ЦК. Возможно образование в малых количествах низкопрочного гидросиликата кальция $\text{C}_2\text{SH(A)}$, что сопровождается развитием кристаллизационного давления и растягивающих внутренних напряжений и приводит к спаду прочности цементного камня. При этом твердение в нормальных условиях обуславливает более однородную микроструктуру.

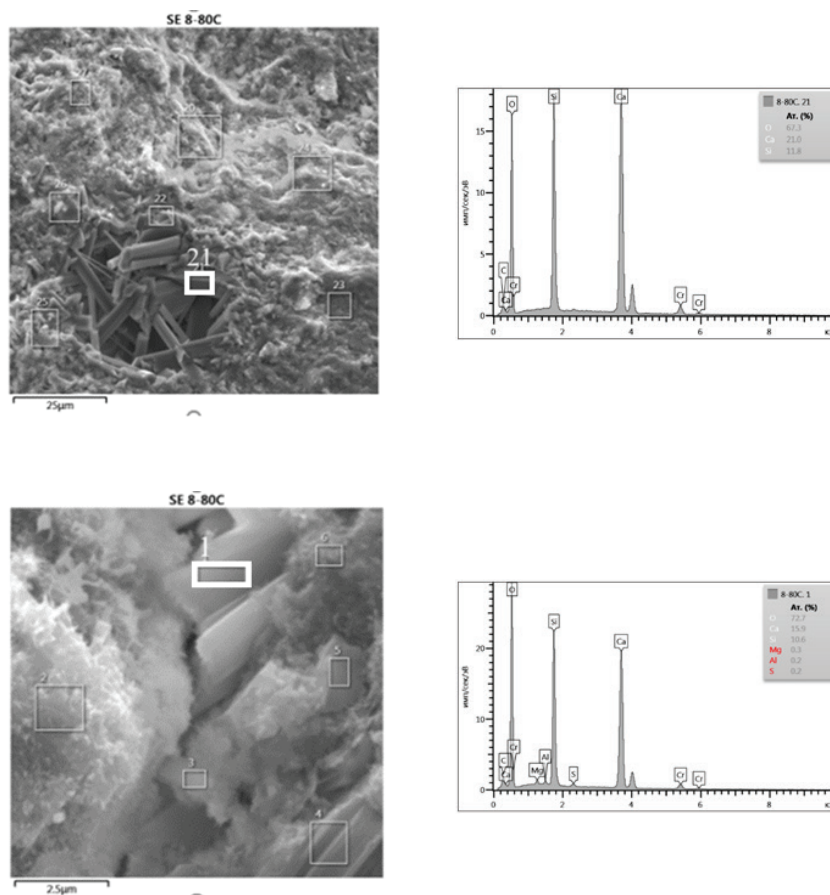


Рис. 9. Микроструктура шлакоцементного камня термовлажностного твердения; гидросиликаты; 12 мес.

Fig. 9. Microstructure of slag-cement stone cured under thermal-humidity conditions; hydrosilicates; 12 months

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что активные минеральные добавки золы уноса и доменного гранулированного шлака способствуют повышению термостойкости ЦК в исследуемом интервале времени (12 мес.). Коэффициент термической стойкости ЦК составил 0,47, при этом у золоцементного камня — 0,72, шлакоцементного — 0,69. Портландцементный камень без добавок быстро теряет прочность и со временем разрушается при повышенных температурах, в этой связи золо- и шлакоцементные составы могут быть рекомендованы к применению в данных условиях. Большое влияние на деструктивные явления при твердении цементных систем в горячей воде оказывают динамика и характер кристаллизации ГСК, однако при соблюдении определенных условий можно достигнуть положительных результатов. Целесообразно вводить АМД, однако при их выборе следует учитывать их активность, применять разновидности с минимальным содержанием оксида алюминия, снижать тонкость помола вяжущего.

Поскольку движущей силой процесса рекристаллизации является разность растворимости между

свободными частицами и контактами срастания, соответственно, чем больше низкоосновных (малорастворимых) продуктов гидратации, тем более термостабильна система. Ввиду того, что активность золы выше, чем доменного гранулированного шлака, при повышенной температуре образуется больше низкоосновных ГСК, что создает более термически устойчивую к рекристаллизации основу. У цементного камня с добавкой менее активного тонкодисперсного доменного гранулированного шлака структура более неоднородна и в большей степени подвержена процессам рекристаллизации новообразований, сопровождающимся ростом кристаллов и фазовыми переходами, что ослабляет ЦК и приводит к спаду прочности.

В процессе длительного твердения при 80 °С образуются гидратные продукты, нехарактерные для цементных систем при обычных температурах. В условиях термовлажностного твердения в ЦК с АМД доля кристаллических продуктов гидратации по отношению к гелю и размеры кристаллов, формирующих грубодисперсную структуру, повышаются по сравнению с продуктами гидратации нормального твердения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shen Z., Zhou H., Brooks A., Hanna D. Evolution of elastic and thermal properties of cementitious composites containing micro-size lightweight fillers after exposure to elevated temperature // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. P. 103931. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103931
2. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/5597918
3. Мазур В.А., Куценко Т.Н., Петров С.В. Выбор рационального метода ремонта монолитных железобетонных оболочек градиентом с учетом использования различных средств подмащивания // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. № 6 (146). С. 11–18. EDN FCPRGC.
4. Чащин Д.Ю., Толыпин Д.А. Проблемы деформации бетона в условиях повышенных технологических температур и влажности // *Инженерное дело на Дальнем Востоке России : мат. VII Всерос. науч.-практ. конф.* 2023. С. 94–98.
5. Славчева Г.С., Ким Л.В. Механизмы и закономерности изменения прочностных характеристик бетонов в связи с их температурно-влажностным состоянием // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2015. № 1 (22). С. 63–70. EDN TNULPV.
6. Толыпина Н.М., Чащин Д.Ю., Хахалева Е.Н. Особенности фазообразования в цементных системах при повышенных температурах и влажности // *Наука и инновации в строительстве : сб. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 170-летию В.Г. Шухова*. 2023. С. 237–241. EDN DMGCWD.
7. Чащин Д.Ю., Толыпин Д.А. Процессы старения и рекристаллизации цементного камня // *Образование. Наука. Производство : сб. докл. XV Междунар. молодежного форума*. 2023. С. 62–65. EDN KCVSBA.
8. Moghadam M.A., Izadifard R.A. Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 253. P. 119206. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119206
9. Абрамов С.А. Термическая усталость тампонажного камня и механизм ее проявления в условиях скважин // *Нефтегазовая геология, геофизика и бурение*. 1984. № 3. С. 48–49.
10. Yanjie B., Hui S., Bai Y., Cai Y. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. P. 104906. DOI: 10.1016/j.job.2022.104906
11. Рябова Л.И. Тампонажные растворы повышенной качества // *Бурение и нефть*. 2003. № 1. С. 30–31. EDN ORCJWF.
12. Smith J.D. Durability of Concrete Structures in Hot Water Environments // *International Journal of Concrete Research*. 2018. Vol. 12 (2). Pp. 145–159.
13. Liu C., Chen J. High Temperature Degradation Mechanism of Concrete with Plastering Layer // *Materials*. 2022. Vol. 15. Issue 2. P. 398. DOI: 10.3390/ma15020398
14. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. Vol. 23. Issue 6. Pp. 793–801. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000225
15. Чащин Д.Ю., Хахалева Е.Н. Первичная защита бетона при воздействии повышенных температур и влажности // *Наука и инновации в строительстве : сб. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию со дня образования БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024. С. 385–389. EDN FMJNAO.
16. Meng T., Chen Y., Ying K., Jin X., Zhan S. Deterioration mechanism of concrete under long-term elevated temperature in a metallurgic environment: A case study of the Baosteel company // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 14. P. e00503. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00503
17. He B., Zhu X., Zhang H., Zheng Q., Zhao H., Onuaguluchi O., Banthia N. et al. Flexural failure of ultra-high performance concrete subjected to the alternating cryogenic and elevated temperature via acoustic emission characterization // *Cement and Concrete Composites*. 2024. Vol. 151. P. 105583. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105583
18. Кравцов В.М. Термодинамика и механизм процесса коррозии тампонажного камня в условиях сероводородной агрессии // *Технология бурения нефтяных и газовых скважин : Межвуз. науч.-техн. сб.* 1980. № 7. С. 159–166.
19. Zhao Y., Li G., Fan C., Pang W., Wang Y. Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/5541181
20. Kim H.J. Comprehensive Study on the Durability of Concrete in Hot Water Environment // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122. Pp. 754–762.

Поступила в редакцию 7 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 21 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Максимовна Толыпина** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; SPIN-код: 4650-2537, Scopus: 0000-0001-5788-8520, ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru;

Шарк Матрасулович Рахимбаев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 143757, Scopus: 0000-0003-0542-0963, ORCID: 0000-0003-0542-0963; dmitriychashin11@gmail.com;

Дмитрий Юрьевич Чашин — аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; SPIN-код: 1395-4281, ResearcherID: HKN-4397-2023, ORCID: 0000-0001-9844-4053; dmitriychashin11@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shen Z., Zhou H., Brooks A., Hanna D. Evolution of elastic and thermal properties of cementitious composites containing micro-size lightweight fillers after exposure to elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*. 2021; 118:103931. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103931
2. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/5597918
3. Mazur V., Kutsenko T., Petrov S. The choice of a rational method for repairing monolithic reinforced concrete shells of cooling towers, taking into account the possibility of using different means of scaffolding. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020; 6(146):11-18. EDN FCPRGC. (rus.).
4. Chashin D.Y., Tolypin D.A. Problems of concrete destruction under conditions of elevated technological temperatures and humidity. *Engineering in the Russian Far East : proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2023; 94-98. (rus.).
5. Slavcheva G.S., Kim L.V. Mechanisms and relationships of strength changes of concretes relating to its temperature-moisture state. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2015; 1(22):63-70. EDN TNULPV. (rus.).
6. Tolypina N.M., Chashin D.Y., Khakhaleva E.N. Features of phase formation in cement systems under elevated temperatures and humidity. *Science and Innovation in Construction : collection of Reports of the VII International Scientific and Practical Conference*. 2023; 237-241. EDN DMGCWD. (rus.).
7. Chashin D.Y., Tolypin D.A. Aging and recrystallization processes of cement stone. Education. Science. Production : collection of Reports of the XV International Youth Forum. 2023; 62-65. EDN KCVSBA. (rus.).
8. Moghadam M.A., Izadifard R.A. Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020; 253:119206. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119206
9. Abramov S.A. Thermal fatigue of cement stone and its manifestation mechanism in well conditions. *Oil and Gas Geology, Geophysics and Drilling*. 1984; 3:48-49. (rus.).
10. Yanjie B., Hui S., Bai Y., Cai Y. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method. *Journal of Building Engineering*. 2022; 57:104906. DOI: 10.1016/j.job.2022.104906
11. Ryabova L.I. High-quality cement slurries. *Drilling and Oil*. 2003; 1:30-31. EDN ORCJWF. (rus.).
12. Smith J.D. Durability of Concrete Structures in Hot Water Environments. *International Journal of Concrete Research*. 2018; 12(2):145-159.
13. Liu C., Chen J. High Temperature Degradation Mechanism of Concrete with Plastering Layer. *Materials*. 2022; 15(2):398. DOI: 10.3390/ma15020398
14. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011; 23(6):793-801. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000225
15. Chashin D.Y., Khakhaleva E.N. Primary protection of concrete under the influence of elevated temperatures and humidity. *Science and Innovation in Construction : collection of Reports of the VIII International Scientific and Practical Conference*. 2024; 385-389. EDN FMJNAO. (rus.).
16. Meng T., Chen Y., Ying K., Jin X., Zhan S. Deterioration mechanism of concrete under long-term elevated temperature in a metallurgic environment: A case study of the Baosteel company. *Case Studies in Construction Materials*. 2021; 14:e00503. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00503
17. He B., Zhu X., Zhang H., Zheng Q., Zhao H., Onuaguluchi O., Bantia N. et al. Flexural failure of ultra-high performance concrete subjected to the alternating

cryogenic and elevated temperature via acoustic emission characterization. *Cement and Concrete Composites*. 2024; 151:105583. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105583

18. Kravtsov V.M. Thermodynamics and mechanism of cement stone corrosion in hydrogen sulfide aggressive environments. *Drilling Technology of Oil and Gas Wells : Inter-University Scientific and Technical Collection*. 1980; 7:159-166. (rus.).

19. Zhao Y., Li G., Fan C., Pang W., Wang Y. Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/5541181

20. Kim H.J. Comprehensive Study on the Durability of Concrete in Hot Water Environment. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:754-762.

Received September 7, 2024.

Adopted in revised form on November 21, 2024.

Approved for publication on November 25, 2024.

B I O N O T E S: **Natalia M. Tolypina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 4650-2537, Scopus: 0000-0001-5788-8520, ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru;

Shark M. Rakhimbaev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 143757, Scopus: 0000-0003-0542-0963, ORCID: 0000-0003-0542-0963; dmitriychashin11@gmail.com;

Dmitriy Yu. Chashin — postgraduate student of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after Vladimir Grigorievich Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 1395-4281, ResearcherID: HKN-4397-2023, ORCID: 0000-0001-9844-4053; dmitriychashin11@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.055

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.306-316

Эффективность применения башенных кранов при строительстве малоэтажных зданий

Олег Викторович Ашихмин, Алена Петровна Шестакова

Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Грузоподъемные механизмы играют важную роль в современном строительном производстве, обеспечивая эффективный и безопасный способ перемещения и подъема материалов и строительных конструкций. Стоянки, путь движения, зоны обслуживания грузоподъемных механизмов отражены на строительных генеральных планах. Проектирование строительной площадки начинается с размещения на ней грузоподъемных механизмов, ведь именно они задают размеры зоны производства работ, местоположение временных дорог, площадок складирования и бытового городка. В общепринятой практике при сравнении вариантов кранов учитывают технико-экономические показатели, связанные с приобретением, арендой и эксплуатацией механизма, не принимая во внимание то, как тот или иной вариант механизации влияет на расположение объектов строительной инфраструктуры и технико-экономические показатели стройгенплана. В связи с возрастающей стесненностью застраиваемых территорий необходим пересмотр системы технико-экономических показателей оценки стройгенпланов с учетом вариантов использования различных видов грузоподъемных механизмов.

Материалы и методы. Изучена нормативно-правовая база, регламентирующая организацию строительной площадки, размещение подъемных механизмов и безопасное строительное производство. Проанализирована проектная и рабочая документация: проекты организации строительства, проекты производства работ, проекты производства работ с применением подъемных сооружений. Выполнено вариантное технологическое проектирование стройгенпланов и оценено влияние принятого грузоподъемного механизма на компактность строительной площадки при возведении малоэтажных объектов.

Результаты. Полученные результаты расширяют представление о выборе грузоподъемных механизмов для возведения малоэтажных объектов. Представленными показателями оценки, учитывающими расположение грузоподъемных кранов на строительной площадке и влияющими на компактность стройгенплана, предлагается дополнить систему технико-экономических показателей оценки эффективности принятых технологических решений.

Выводы. Проектирование строительных генеральных планов должно быть вариантным с рассмотрением различных грузоподъемных механизмов; эффективность выбора крана должна определяться не только системой технико-экономических показателей, но и оценкой влияния на строительную площадку в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный генеральный план, технико-экономические показатели, самомонтирующийся башенный кран, самоходный кран, стесненные условия, временные дороги, коэффициент стесненности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ашихмин О.В., Шестакова А.П. Эффективность применения башенных кранов при строительстве малоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 306–316. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.306-316

Автор, ответственный за переписку: Алена Петровна Шестакова, shestakovaap@tyuiu.ru.

Efficiency of tower cranes in the construction of low-rise buildings

Oleg V. Ashihmin, Alena P. Shestakova

Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Lifting mechanisms are important in modern construction production, providing an efficient and safe way to move and lift materials and building structures. Stations, travel routes, and service areas for lifting mechanisms are reflected in construction master plans. Site design begins with the installation of lifting equipment. In common practice, when comparing crane options, technical and economic indicators associated with the purchase, rental and operation of the mechanism are taken into account, without taking into account how a particular mechanization option affects the location of construction infrastructure and technical and economic indicators of the construction plan. Due to the increasing space constraint, it is necessary to revise the system of technical and economic parameters for construction plans assessing.

Materials and methods. The normative-legal base regulating the construction site organization, lifting mechanisms placement and safe construction production is studied. Design and working documentation is analyzed: construction organization projects, projects of works production, projects of works production with application of lifting facilities. The variant technologi-

cal design of construction plans was carried out and the influence of the accepted lifting mechanism on the compactness of the construction site at erection of low-rise objects was estimated.

Results. The obtained results expand the idea about the choice of lifting mechanisms for the erection of low-rise objects. It is suggested to supplement the system of technical and economic indicators of evaluation of the efficiency of the adopted technological solutions with the presented evaluation indicators, which take into account the location of hoisting cranes on the construction site and affect the compactness of the construction site.

Conclusions. The design of construction master plans should be varied and performed with the use of various lifting equipment. The effectiveness of choosing lifting machinery should be determined by a system of parameters along with the main technical and economic parameters to assess construction plans.

KEYWORDS: construction master plan, technical and economic parameters, self-erecting tower crane, fully mobile crane, construction site crowding, temporary roads, construction site crowding ratio

FOR CITATION: Ashihmin O.V., Shestakova A.P. Efficiency of tower cranes in the construction of low-rise buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):306-316. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.306-316 (rus.).

Corresponding author: Alena P. Shestakova, shestakovaap@tyuiu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные механизмы занимают ведущее место в сфере механизации монтажных и погрузочно-разгрузочных работ в строительстве. Применение современных моделей грузоподъемных механизмов обеспечивает выполнение требований технологии строительного производства, рост производительности и улучшение условий труда машинистов и рабочих.

Эффективный выбор и расположение грузоподъемных механизмов позволяют рационально использовать отведенную под строительство площадку, повысить технологичность принятых решений и, как следствие, снизить накладные расходы на содержание стройки.

Количество, марка, расположение грузоподъемных механизмов приводятся на строительном генеральном плане (СГП). Проектирование СГП начинается с выбора и размещения грузоподъемного механизма. Несмотря на проводимые исследования методов повышения эффективности организационно-технологических решений в проекте организации строительства (ПОС) и проекте производства работ (ППР) на основе автоматизации проектирования СГП [1–5], разработка стройгенпланов остается преимущественно ручным процессом. Марка, количество и местоположение монтажных кранов во многом определяют стройгенплан и эффективность решений, принятых в процессе технологического проектирования. Отличием современных условий проектирования является внешняя и внутренняя стесненность строительной площадки, которая накладывает ограничения на эффективное развертывание строительного производства [5–10]. В связи с возрастающей стесненностью застраиваемых территорий и увеличением многообразия грузоподъемных механизмов необходим пересмотр системы технико-экономических показателей оценки стройгенпланов с точки зрения влияния на них выбранного грузоподъемного механизма.

В результате изучения литературы все существующие показатели оценки строительных генеральных планов были разделены на две группы:

- экономические показатели по стройке в целом;

- технико-экономические показатели строительного генерального плана^{1, 2, 3} [11, 12].

Среди рассмотренных показателей отсутствуют индикаторы, позволяющие оценить, насколько эффективно подобран кран с учетом условий заданной строительной площадки. Проектирование СГП как объектного, так и общеплощадочного начинается с размещения грузоподъемных механизмов и определения параметров их работы. Монтажный кран или другой грузоподъемный механизм задает размещение основных элементов строительного хозяйства на строительной площадке: временные здания и сооружения должны находиться за пределами опасной зоны работы крана, тогда как склады и временные дороги должны попадать в зону обслуживания крана. Подбор крана проводится по техническим параметрам [13–16], окончательное решение о выборе марки крана принимает подрядчик, руководствуясь также экономическим обоснованием использования того или иного варианта механизации.

Сегодня имеется немало прогрессивных способов производства строительных работ, но из-за низкого уровня организационно-технологического проектирования (ОТП) они не получают необходимого развития. Поскольку монтажный кран задает расположение объектов на СГП и в значительной степени влияет на компактность строительной площадки и технологичность строительного производства, необходимо совершенствование методик оценки результатов ОТП в части выбора, обоснования и размещения монтажных механизмов на стройплощадке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проанализируем влияние выбора вида грузоподъемного механизма на компактность строитель-

¹ Дикман Л.Г. Организация строительного производства : учебник для строительных вузов. 5-е изд. перераб. и доп. М. : Изд-во АСВ, 2006. 608 с.

² Костюченко В.В., Кудинов Д.О. Организация, планирование и управление в строительстве : учебное пособие. Ростов н/Д. : Феникс, 2006. 352 с.

³ Ширишков Б.Ф. Организация, управление и планирование в строительстве : учебник. М. : АСВ, 2016. 528 с.

ной площадки на примере малоэтажных объектов, оценим достаточность существующей системы технико-экономических показателей для оценки СГП с учетом заданных кранов и факторов стесненности.

В рассмотренных системах показателей оценки отсутствуют показатели, позволяющие прямо оценить, насколько эффективно подобран кран. В связи с чем авторами предложено несколько критериев оценки стройгенпланов, учитывающих современные тенденции, которые могут дополнить традиционные показатели.

В условиях свободного формирования СГП его площадь будет ограничиваться только существующими нормами, в условиях стесненности площадь СГП может быть значительно сокращена, и в этом случае условие стесненности можно охарактеризовать коэффициентом стесненности:

$$K_{\text{ст}} = \frac{F_{\text{мин ст}}}{F_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{мин ст}}$ — площадь строительного генерального плана в стесненных условиях; F_{max} — площадь строительного генерального плана в условиях свободного формирования.

С другой стороны, в процессе проектирования, рассматривая различные варианты СГП, одни организационно-технологические решения приводят к сокращению площади строительной площадки, другие решения, наоборот, заставляют занимать под строительство весь отведенный участок. Данный аспект можно охарактеризовать коэффициентом компактности:

$$K_{\text{комп}} = \frac{F_{\text{мин}}}{F_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{мин}}$ — площадь строительного генерального плана минимизированная; F_{max} — площадь строительного генерального плана в условиях свободного формирования.

Чем меньше ограничений наложено на работу крана, тем более полно используются его грузоподъемные характеристики, тем проще организовать работу. Также сокращается количество простоев, связанных с невозможностью совместной работы нескольких механизмов. Для оценки данного критерия можно рассчитать коэффициент ограниченности зоны обслуживания крана по формуле:

$$k_{\text{огр}} = \frac{F_{\text{обсл}}}{F_{\text{обсл max}}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{обсл}}$ — площадь зоны обслуживания грузоподъемным механизмом; $F_{\text{обсл max}}$ — площадь зоны обслуживания грузоподъемным механизмом без учета ограничений.

Чем больше зона обслуживания крана, тем больше площадь, занятая строительством, тем сложнее система ограничений, которую необходимо накладывать на работу кранов, что, в свою очередь, сказывается на производительности строительно-монтажных

работ. Для оценки рационального размещения грузоподъемного механизма предложим коэффициент эффективности, определяемый по формуле:

$$k_{\text{эф}} = \frac{F_{\text{застр}}}{F_{\text{обсл}}}, \quad (4)$$

где $F_{\text{застр}}$ — площадь застройки; $F_{\text{обсл}}$ — площадь зоны обслуживания грузоподъемным механизмом.

Первоначально оценить компактность размещения грузоподъемных механизмов можно радиусом описанной вокруг зон обслуживания окружности; такой радиус показывает «размах» зоны обслуживания краном и не требует долгих вычислений:

$$R_{\sum \text{з.о.}} \rightarrow \min. \quad (5)$$

В случае возведения здания несколькими кранами можно предложить еще один критерий эффективного размещения подъемных сооружений на строительной площадке — сокращение площади наложения зон обслуживания:

$$F_{\text{общ.з.о.}} \rightarrow 0. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Традиционно для возведения малоэтажных объектов рассматривают стреловые самоходные краны на гусеничном или колесном ходу. В данном случае при определении этажности зданий устанавливается следующий тип застройки:

- малоэтажная — 1–4 этажа (с учетом мансарды);
- среднеэтажная — 5–8 этажей;
- многоэтажная — 9 этажей и выше⁴.

Применение башенных кранов для малоэтажного строительства — прогрессивное направление повышения технологичности и компактности строительных площадок. Альтернативный выбор средних и малых грузоподъемных механизмов служит фактором формирования организационно-технологического механизма повышения эффективности производства работ при капитальном ремонте зданий [17] и интенсификации малоэтажного строительства [18, 19]. Перспективным направлением в организации малоэтажного строительства, реконструкции и капитальном ремонте мало- и среднеэтажных объектов является использование современных самомонтирующихся башенных кранов. Самомонтирующийся башенный кран — это башенный кран, монтируемый на объекте с помощью собственных механизмов, без верхолазных работ и с оперативным временем монтажа не более 30 мин⁵. Быстромонтируемые краны можно эффек-

⁴ Об утверждении нормативов градостроительного проектирования Московской области : Постановление Правительства Московской области от 17.08.2015 № 713/30 (с изменениями на 31.10.2023). URL: <https://docs.cntd.ru/document/537978947>

⁵ РД 22-28-37-02. Требования к организации и проведению работ по монтажу (демонтажу) грузоподъемных кранов : утв. ФГУП «СКТБ БК» 03.03.2002.

тивно использовать для решения задач малоэтажно-го строительства объектов социального, культурного и бытового обслуживания. Они обеспечивают хорошую досягаемость и грузоподъемность при небольшой площади, что делает их пригодными для работы в стесненных условиях. Самомонтирующиеся башенные краны доставляются на строительную площадку и могут быть установлены менее чем за час. Среди преимуществ также можно отметить возможность дистанционного управления, которой обладают многие краны из линейки самомонтирующихся.

В результате анализа технических паспортов все самомонтирующиеся краны были разделены на три размерных группы по максимальному вылету:

- от 20 до 30 м включительно;
- от 30 до 40 м включительно;
- от 40 м включительно.

Для каждой размерной группы составлен каталог (табл. 1–3).

Выполненная систематизация самомонтирующихся башенных кранов позволяет увидеть широ-

кое разнообразие модельного ряда, насчитывающее более 80 моделей, представленных только на отечественном рынке, и расширить мнение о возможностях использования башенных кранов.

В рамках проведенной научно-исследовательской работы оценено влияние выбора грузоподъемных механизмов на показатели стройгенплана. Были запроектированы в вариантном исполнении СГП на возведение нескольких малоэтажных объектов: школа с помещениями для дошкольного образования в Уватском районе, школа на 800 мест в г. Салехарде, школа на 1200 мест в г. Тюмени. По одному из объектов приведем результаты вариантного технологического проектирования. Рассматриваемая школа со встроенными помещениями для дошкольного образования представляет собой 3-этажное здание из двух разновысотных блоков с техподпольем. Основной центральный блок — учебный на 60 учащихся в осях 5–17 и А–Р и примыкающий к нему одноэтажный детский сад на 25 дошкольных мест, размерами в плане 12,6 × 24 м. С северной стороны

Табл. 1. Каталог самомонтирующихся башенных кранов: максимальный вылет от 20 до 30 м

Table 1. Catalog of self-erecting tower cranes: maximum outreach from 20 to 30 m

Высота подъема, м Height of lift, m	Вылет, м (грузоподъемность на максимальном вылете, т) Outreach, m (lifting ability at maximum outreach, tun)							
	20	21	22	24	25	26	27	28
16	–	–	Liebherr 13 HM.1 (0,5)	–	–	–	–	–
17	Potain Igo 13(0,7) XJCM JFYT1720-10(1) XJCM QTYZ-10 (1)	–	–	–	–	–	–	–
18	–	Terex CBR 21H (0,6)	–	–	–	–	–	–
19	–	–	Potain Igo M 14 (0,6) Potain Igo 15 (0,7)	Potain Igo 18 (0,7) Terex CBR 24 PLUS (0,75)	Liebherr L1-24 (0,95)	Potain Igo 21 (0,7) Potain Igo MA 21 (0,7)	Liebherr 22 HM (0,7)	Potain Hup M 28-22 A (0,85)
20	–	–	–	–	–	–	–	Potain Igo 22 (0,85)
21	–	–	–	–	–	–	Terex CBR 28 PLUS (0,9)	–
22	–	XJCM QTYZ-20 (1)	–	–	–	–	–	–
25	–	–	–	–	–	–	XJCM JFYT2527-20 (1) XJCM JFYT2527-30 (1,2)	–

Табл. 2. Каталог самомонтирующихся башенных кранов: максимальный вылет от 30 до 40 м включительно
Table 2. Catalog of self-erecting tower cranes: maximum outreach from 30 to 40 m inclusive

Высота подъема, м Height of lift, m	Вылет, м (грузоподъемность на максимальном вылете, т) Outreach, m (lifting ability at maximum outreach, tun)					
	30	32	33	35	36	40
21	Potain Igo 30 (0,9) Liebherr L1-32 (1,05) Terex CSE 30 (1,2)	—	—	—	—	—
22	Potain Igo 32 (1,1) РБК-5.60 (1,5)	—	—	—	—	—
22,7	Potain Evy 30-23 4 t Munsters CRL 30-36 (1,15)	—	—	—	—	—
23	—	—	—	—	—	San Marco SMH 401 (1) Potain IGO 50 (1,1)
25	—	—	—	—	Terex CSE 36 (1,3)	Terex CSE 40 (1,05) Terex CBR 40H (1)
26	—	—	Liebherr 34 K (1,1)	—	—	San Marco SMH 400 (1)
27	—	Potain Hup 32-27(1)	—	—	—	—
28	—	—	—	—	Liebherr 42 K.1 (1,2) Liebherr 42 KR.1 (1,2)	Potain GTMR 336A (1)
29,4	—	—	—	Potain GTMR 360B (2)	—	Potain GTMR 340A (1)
30	—	—	Raimondi HR 33 (0,8)	—	—	Potain Hup 40-30 (1)
31	—	—	—	—	—	Liebherr 53 K (1,1)
32,8	—	—	—	—	—	Potain GTMR 350A (1,25)
35	—	—	—	—	—	Potain Igo T 70 A (1,45)

Табл. 3. Каталог самомонтирующихся башенных кранов: максимальный вылет от 40 м
Table 3. Catalog of self-erecting tower cranes: maximum outreach from 40

Высота подъема, м Height of lift, m	Вылет, м (грузоподъемность на максимальном вылете, т) Outreach, m (lifting ability at maximum outreach, tun)					
	42	43	45	48	50	55
28	Terex Peiner CRL 42-80 (1,4)	—	—	—	—	—
32,8	—	—	Potain GTMR 366A (1,3)	—	Potain GTMR 386A (1,1)	—
33,4	—	—	—	—	Potain GTMR 400A (1,73)	—
34,6	—	Liebherr 65 K.1 (1,35)	—	—	—	—
37,3	—	—	—	—	Potain Igo T130 (1,4)	—

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Высота подъема, м Height of lift, m	Вылет, м (грузоподъемность на максимальном вылете, т) Outreach, m (lifting ability at maximum outreach, tun)					
	42	43	45	48	50	55
38	–	–	Potain Igo T85A (1,4)	Potain Igo T 99 (1,2)	–	–
40,4	–	–	–	Liebherr 81 K.1 (1,35)	–	–
41,5	–	SMK-5.66 (1)	–	–	–	Liebherr 125 K (1,3)

к центральному блоку примыкает блок актового зала с размерами в плане 19,54 × 10,54 м. Фрагмент строительного генерального плана малоэтажной школы с помещениями детского сада, возводимой самоходным краном, приведен на рис. 1.

Для возведения школы самоходным краном требуется устройство кольцевой дороги, в связи с чем увеличивается площадь временных дорог

и стройгенплана. Из-за большого количества стоянок зона обслуживания значительно выходит за пределы пятна застройки, что, в свою очередь, увеличивает границу опасной зоны при работе крана.

Современные стесненные условия строительства требуют компактно спроектированных стройгенпланов. Используя разработанные каталоги самомонтирующихся кранов, был запроектирован еще один

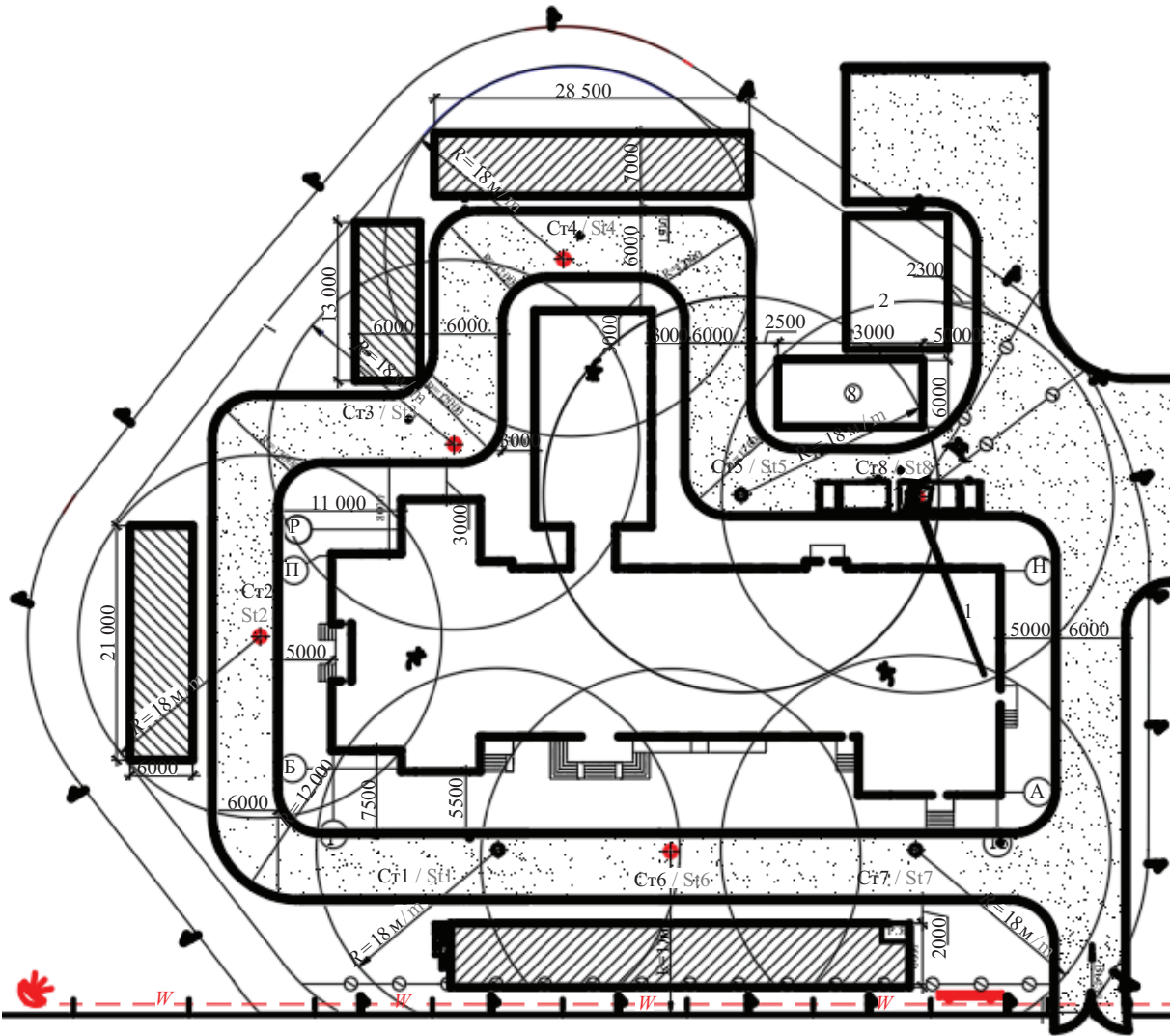


Рис. 1. Фрагмент строительного генерального плана возведения школы самоходным краном KC-55729B

Fig. 1. Fragment of the construction master plan for the school by a fully mobile crane KS-55729V

вариант стройгенплана с применением самомонтирующегося башенного крана Potain GTMR 360B (рис. 2).

Применение башенного крана не требует устройства кольцевой дороги, поэтому площадь временных дорог сокращается, что позволяет уменьшить площадь всей строительной площадки. Благодаря большому вылету, не уступающему традиционным башенным кранам, возведение здания можно вести с одной стоянки, что уменьшает зону обслуживания и опасную зону.

Результаты вариантного проектирования СГП с учетом предложенных показателей сведены в табл. 4.

Во втором случае при применении башенного крана площадь стройгенплана, временных дорог, протяжен-

ность временного ограждения и электроснабжения меньше. Предложенные авторами показатели — коэффициент компактности стройгенплана, коэффициент эффективности размещения грузоподъемного механизма, радиус размаха зоны обслуживания крана — при использовании самомонтирующегося крана лучше.

Сравнив два СГП строительства школы с помещениями для дошкольного образования, можно сделать следующие выводы:

- применение башенного крана позволило уменьшить площадь строительной площадки с 12 350 до 10 055 м², т.е. на 18,6 %;

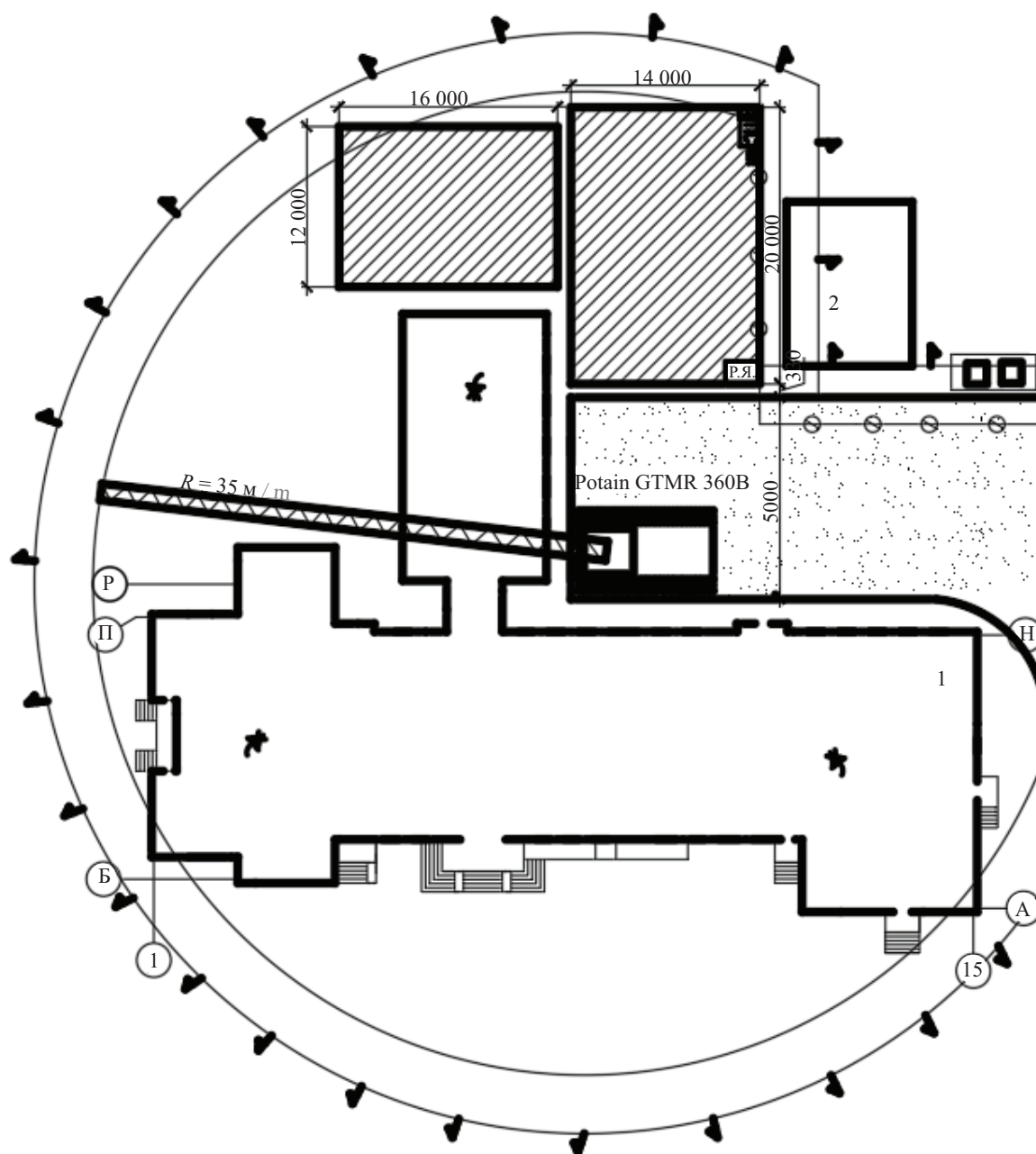


Рис. 2. Фрагмент строительного генерального плана возведения школы самомонтирующимся башенным краном Potain GTMR 360B

Fig. 2. Fragment of the construction master plan for the school construction using a self-erecting tower crane Potain GTMR 360B

Табл. 4. Показатели сравнения вариантов стройгенпланов

Table 4. Comparison parameters for alternate construction plans

Показатель Parameters	Вариант 1 Самоходный кран КС-55729В Option 1 Fully mobile crane KC-55729B	Вариант 2 Самомонтирующийся башенный кран Potain GTMR 360B Option 2 Self-erecting tower crane Potain GTMR 360B
Площадь СГП, м² Construction master plan area, m²	12 350	10 055
Площадь временных дорог, м² Temporary access roads area, m²	3848	1832
Протяженность временного ограждения строительной площадки, м Temporary enclosure length of the construction site, m	459	417
Протяженность временных сетей электроснабжения, м Length of temporary power supply networks, m	458	416
Коэффициент компактности СГП Compactness ratio of the construction master plan	1	0,81
Коэффициент эффективности размещения грузозахватных механизмов Efficiency ratio for placement of load gripping machinery	0,3	0,48
Радиус «размаха» зоны обслуживания крана, м Span radius of the crane coverage area, m	51,2	35
Коэффициент ограниченности СГП Limitation ratio of the construction master plan	0,94	0,83

- использование башенного крана дало возможность сократить площадь временных дорог с 3848 до 1832 м², т.е. на 52,4 %;
- в связи с сокращением площадки строительства уменьшилась протяженность временного ограждения на 42 м, т.е. на 9,2 %;
- так как освещение строительной площадки располагают по периметру, то протяженность временных сетей электроснабжения тоже уменьшилась на 42 м, т.е. на 9,2 %;
- здание школы сложной формы, но при этом компактное, в связи с чем башенный кран его возводит с одной стоянки, так что зона обслуживания крана небольшая, а коэффициент эффективности размещения грузозахватных механизмов выше, чем при использовании самоходного крана;
- радиус размаха, демонстрирующий влияние грузоподъемного механизма на строительную площадку, в случае применения башенного крана меньше и составляет 35 м, а при возведении самоходным краном 51,2 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного вариантного проектирования сделан вывод, что, минуя традиционный подход и используя башенные краны для малоэтажного строительства, можно достичь повышения эффективности технологических решений и сокращения объемов временного строительства. В ходе ра-

боты было рассмотрено вариантное проектирование строительных генеральных планов трех малоэтажных объектов сложной формы. Проанализированы варианты возведения как самоходными кранами, так и башенными. С точки зрения эффективного размещения объектов строительного производства применительно к данным зданиям наибольший эффект отмечен при использовании башенных кранов. Применение данного типа механизмов позволяет значительно сократить площадь строительной площадки и временных дорог, разместить компактным образом все объекты строительного производства.

Качество разработки проектов производства работ ненамного улучшилось к настоящему времени, при этом ППР остается практически единственным документом, в котором приведен полный комплекс организационно-технологических решений по производству работ в привязке к ресурсным возможностям подрядчика [20]. Оценка современных стройгенпланов должна проводится с учетом факторов стесненности и разнообразия грузоподъемных механизмов, которые должны быть отражены в системе технико-экономических показателей. В дополнение к существующей системе показателей предложены показатели, учитывающие расположение грузоподъемных кранов на строительной площадке и влияющие на компактность стройгенплана:

- коэффициент ограниченности зоны обслуживания крана;

- коэффициент эффективности размещения грузоподъемных механизмов;
- радиус «размаха» зоны обслуживания крана;
- площадь наложения зон обслуживания нескольких грузоподъемных механизмов.

Применение башенных кранов для малоэтажного строительства в обход традиционному подходу дает возможность более компактно спроектировать строительный генеральный план, что является актуальной задачей в условиях возрастающей внутригородской стесненности. В ходе вариантного проектирования выявлены факторы, определяющие по-

вышение эффективности использования башенных кранов при малоэтажном строительстве: сложная форма здания, отсутствие тяжелых большепролетных конструкций, стесненность на строительной площадке, а также невозможность устройства кольцевой дороги.

В рамках настоящего исследования задан вектор для проектировщиков, подрядчиков и собственников строительной техники в выборе более рациональных грузоподъемных механизмов, которые позволяют повысить эффективность строительства, сократить затраты на содержание стройки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алимбиев К.О. Возможность автоматизации построения строительного генерального плана // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ студентов Института цифровых технологий и моделирования в строительстве (ИЦТМС) НИУ МГСУ. 2022. С. 356–360. EDN MVDFQA.
2. Якимов И.А. Исследование методов повышения эффективности организационно-технологического решения в ПОС и ППР на основе возможности автоматизации проектирования строительных генеральных планов // Наука и молодежь : мат. XIX Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2022. С. 167–169. EDN MYWNFW.
3. Bansal V.K. Integrated CAD and GIS-based framework to support construction planning: case study // Journal of Architectural Engineering. 2017. Vol. 23. Issue 3. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000262
4. RazaviAlavi S., AbouRizk S. Site layout and construction plan optimization using an integrated genetic algorithm simulation framework // Journal of Computing in Civil Engineering. 2017. Vol. 31. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000653
5. Wang X. Using augmented reality to plan virtual construction worksite // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2007. Vol. 4. Issue 4. DOI: 10.5772/5677
6. Розанцева Н.В. Аспекты организации строительства в современных условиях городской уплотнительной застройки // Строительное производство. 2023. № 3. С. 28–34. DOI: 10.54950/26585340_2023_3_28. EDN HSGMNH.
7. Субботина Е.К., Лукина Л.А., Кононова Е.С., Громов В.С., Бопун-оол А.А., Мutowина А.С. и др. Организация строительных работ в стесненных условиях // Экономика и предпринимательство. 2019. № 11 (112). С. 947–950. EDN YNZMLK.
8. Aleksanin A. Possible risks in construction of the facility in cramped conditions // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 06021. DOI: 10.1051/mateconf/201825106021
9. Gaidukov P., Pugach E. Prospects for the development of stay in place formwork for low-rise buildings in cramped conditions // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 258. P. 09030. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809030
10. Sokolov N.S., Viktorova S.S., Maguskin V.V., Malyanova L.I. Common mistakes made under facility construction in cramped conditions // Journal of Physics : Conference Series. 2021. Vol. 1928. Issue 1. P. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012022
11. Ланидус А.А., Демидов Л.П. Исследование факторов, влияющих на показатель потенциала строительной площадки // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 160–166. EDN SATGXN.
12. Ланидус А.А., Олейник П.П. Обоснование процесса выбора организационно-технологических решений // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 4. С. 70–74. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.04.70-74. EDN IHPPPR.
13. Ланидус А.А., Катасонова М.А. Параметры подбора кранового хозяйства при проектировании строительных генеральных планов // Строительное производство. 2019. № 1. С. 56–61. DOI: 10.54950/26585340_2019_1_56. EDN CJYXSJ.
14. Sohn H.W., Hong W.K., Lee D., Lim C., Wang X., Kim S. Optimum tower crane selection and supporting design management // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2014. Vol. 11. Issue 8. DOI: 10.5772/58438
15. Zhang Y., Chen K. Digital technologies for enhancing crane safety in construction: a combined quantitative and qualitative analysis // Journal of Civil Engineering and Management. 2023. Vol. 29. No. 7 (2023). Pp. 604–620. DOI: 10.3846/jcem.2023.19574
16. Zhadanovsky B., Bazanov V. Organizational and technological solutions for performing works using specialty equipment // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06002. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706002

17. Петросян Р.С. Формирование организационно-технологического механизма повышения технологичности производства работ при капитальном ремонте зданий // *Строительство: наука и образование*. 2023. Т. 13. № 1. С. 84–97. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.6. EDN UQDSGZ.

18. Gusakova N., Gusakov A., Prokhorova Yu., Karakozova I. Development of organizational and economic mechanism of intensification of low-rise housing construction in remote areas with special climatic condi-

tions // *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 363. P. 02035. DOI: 10.1051/e3sconf/202236302035

19. Motyčka V., Gašparík J., Příbyl O., Štěrba M., Hořínková D., Kantová R. Effective use of tower cranes over time in the selected construction process // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 4. P. 436. DOI: 10.3390/buildings12040436

20. Олейник П.П. Концепция повышения уровня проектов производства работ // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 2. С. 59–63. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.59-63. EDN VGKUQF.

Поступила в редакцию 5 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 23 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 27 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Олег Викторович Ашихмин** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 747173, Scopus: 57192667381; ashihminov@tyuiu.ru;

Алена Петровна Шестакова — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры строительного производства; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 756676, Scopus: 57205079167, ResearcherID: HKV-4731-2023, ORCID: 0000-0003-1572-7280; shestakovaap@tyuiu.ru.

Вклад авторов:

Ашихмин О.В. — концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Шестакова А.П. — написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Alimpiev K.O. Possibility of automation of a construction master. *Days of Student Science : collection of reports of the scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Digital Technologies and Modeling in Construction National Research University Moscow State University of Civil Engineering*. 2022; 356-360. EDN MVDFQA. (rus.).

2. Yakimov I.A. Research of methods for increasing the efficiency of organizational and technological solutions in Construction Management Plan and Work Design based on the possibility of automation of construction master. *Science and Youth : Materials of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists*. 2022; 167-169. EDN MYWNFW. (rus.).

3. Bansal V.K. Integrated CAD and GIS-Based Framework to Support Construction Planning: Case Study. *Journal of Architectural Engineering*. 2017; 23(3). DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000262

4. RazaviAlavi S., AbouRizk S. Site layout and construction plan optimization using an integrated genetic algorithm simulation framework. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2017; 31(4). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000653

5. Wang X. Using augmented reality to plan virtual construction worksite. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007; 4(4). DOI: 10.5772/5677

6. Ryazantseva N.V. Aspects of the organization of construction in modern conditions of urban sealing development. *Construction Production*. 2023; 3:28-34. DOI: 10.54950/26585340_2023_3_28. EDN HSGMNH. (rus.).

7. Subbotina E.K., Lukina L.A., Kononova E.S., Gromov V.S., Bopun-ool A.A., Mutovina A.S. et al. Organization of construction work in cramped conditions. *Economics and Entrepreneurship*. 2019; 11(112):947-950. EDN YNZMLK. (rus.).

8. Aleksanin A. Possible risks in construction of the facility in cramped conditions. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:06021. DOI: 10.1051/matec-conf/201825106021

9. Gaidukov P., Pugach E. Prospects for the development of stay in place formwork for low-rise buildings in cramped conditions. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:09030. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809030

10. Sokolov N.S., Viktorova S.S., Maguskin V.V., Malyanova L.I. Common mistakes made under facility construction in cramped conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1928(1):012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012022

11. Lapidus A.A., Demidov L.P. Investigation of the Factors Influencing the Potential Indicator of a Construction Site. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 4:160-166. EDN SATGXN. (rus.).

12. Lapidus A.A., Oleynik P.P. Justification of the process of choosing organizational and technological solutions. *Industrial and Civil Engineering*. 2024; 4:70-74. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.04.70-74. EDN IHPPPR. (rus.).
13. Lapidus A.A., Katasonova M. Parameters of the crane selection during the designing of the construction master plans. *Construction Production*. 2019; 1:56-61. DOI: 10.54950/26585340_2019_1_56. EDN CJYXSJ. (rus.).
14. Sohn H.W., Hong W.K., Lee D., Lim C., Wang X., Kim S. Optimum Tower Crane Selection and Supporting Design Management. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014; 11(8). DOI: 10.5772/58438
15. Zhang Y., Chen K. Digital technologies for enhancing crane safety in construction: a combined quantitative and qualitative analysis. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2023; 29(7):(2023):604-620. DOI: 10.3846/jcem.2023.19574
16. Zhadanovsky B., Bazanov V. Organizational and technological solutions for performing works using specialty equipment. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06002. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706002
17. Petrosyan R.S. Formation of an organisational and technological mechanism to improve the manufacturability of works in total building renovation. *Construction: Science and Education*. 2023; 13(1):84-97. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.6. EDN UQDSGZ. (rus.).
18. Gusakova N., Gusakov A., Prokhorova Yu., Karakozova I. Development of organizational and economic mechanism of intensification of low-rise housing construction in remote areas with special climatic conditions. *E3S Web of Conferences*. 2022; 363:02035. DOI: 10.1051/e3sconf/202236302035
19. Motyčka V., Gašparík J., Přibyl O., Štěrbá M., Hořínková D., Kantová R. Effective use of tower cranes over time in the selected construction process. *Buildings*. 2022; 12(4):436. DOI: 10.3390/buildings12040436
20. Oleynik P.P. Concept of increasing the level of projects of work production. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 2:59-63. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.59-63. EDN VGKUQF. (rus.).

Received September 5, 2024.

Adopted in revised form on October 23, 2024.

Approved for publication on October 27, 2024.

B I O N O T E S : **Oleg V. Ashihmin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Production; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 747173, Scopus: 57192667381; ashihminov@tyuiu.ru;

Alena P. Shestakova — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Production; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 756676, Scopus: 57205079167, ResearcherID: HKV-4731-2023, ORCID: 0000-0003-1572-7280; shestakovaap@tyuiu.ru.

Contribution of the authors:

Oleg V. Ashihmin — conceptualization, methodology, final conclusions.

Alena P. Shestakova — writing of the article, revision of the article, supervision.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 332.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.317-328

Концептуальный подход к управлению инновационным развитием сферы теплоснабжения

Валерия Викторовна Глазкова, Николай Александрович Верстин*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно стратегическим приоритетам Российской Федерации в области энергетики энергосбережение и рациональное использование ресурсов выступает фокусом внимания в ходе развития и функционирования сфер топливно-энергетического комплекса страны. Однако энергетические ресурсы России используются с недостаточной эффективностью, а высокие значения энергоёмкости валового внутреннего продукта страны свидетельствуют о сильной изношенности основных фондов и их технологической отсталости. Отечественная сфера теплоснабжения, являющаяся значимой частью топливно-энергетического комплекса страны, показывает низкую эффективность и надёжность, о чем свидетельствуют рост количества аварий, высокие потери тепла в сетях и значительная доля инфраструктуры, нуждающейся в замене. Один из инструментов, способствующих осуществлению в сфере теплоснабжения процессов ресурсо- и энергосбережения, — использование инноваций, позволяющих ускорить темпы развития сферы в стратегической перспективе. Цель исследования — формирование концептуального подхода к управлению инновационным развитием сферы теплоснабжения.

Материалы и методы. Нормативная основа исследования — законодательные акты Российской Федерации, регулирующие деятельность теплоснабжения и определяющие направления государственной энергетической политики. Работа базируется на фундаментальных теориях управления и теории инноваций. Методической основой исследования выступают сложившиеся в экономической литературе подходы к определению инновационного климата и инновационного потенциала организаций, подходы к оценке эффективности внедрения и реализации инноваций, а также положения системного, проектного и стейкхолдерского подходов к управлению.

Результаты. Результатом исследования является сформированный концептуальный подход к управлению инновационным развитием сферы теплоснабжения, конкретизирующий условия, способствующие инновационному развитию, и определяющий возможность разработки методов обеспечения данных условий для достижения целей инновационного развития теплоснабжения.

Выводы. Предложенный инструмент управления инновационным развитием сферы теплоснабжения позволяет реализовывать стратегические перспективы ее развития в фокусе ресурсо- и энергосбережения с опорой на применение инновационных материалов, технологий и систем управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: топливно-энергетический комплекс, теплоэнергетика, теплоснабжение, инновации, инновационное развитие теплоснабжения, энергосбережение, ресурсосбережение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глазкова В.В., Верстин Н.А. Концептуальный подход к управлению инновационным развитием сферы теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 317–328. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.317-328

Автор, ответственный за переписку: Валерия Викторовна Глазкова, leram86@mail.ru.

A conceptual approach to the management of the innovative development of the heat supply sector

Valeriya V. Glazkova, Nikolai A. Verstin*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. According to the strategic priorities of the Russian Federation in the field of energy, energy saving and rational use of resources is the focus of attention in the development and functioning of the fuel and energy complex of the country. However, the energy resources of Russia are used with insufficient efficiency, and high energy intensity values of the country's gross domestic product indicate a strong deterioration of fixed assets and their technological backwardness. The domestic heat supply sector, which is an important part of the country's fuel and energy complex, shows low efficiency and reliability, as evidenced by an increase in the number of accidents, high heat losses in networks and a significant proportion of infrastructure in need of replacement. One of the tools contributing to the implementation of resource and energy saving processes in the field of heat supply is the use of innovations that allow accelerating the pace of development of the sphere in the strategic perspective. In this regard, the purpose of the study is to form a conceptual approach of the management of the innovative development of the heat supply sector.

Materials and methods. The normative basis of the study is the legislative acts of the Russian Federation regulating the activities of heat supply and determining the directions of state energy policy. The work is based on the fundamental theories of management and the theory of innovation. The methodological basis of the study is the approaches developed in the economic literature to determining the innovation climate and innovative potential of organizations, approaches to assessing the effectiveness of the introduction and implementation of innovations, as well as the provisions of systemic, project and stakeholder approaches to management.

Results. The result of the research is the formed conceptual approach to the management of innovative development of the heat supply sector, specifying the conditions that promote innovative development, and determining the possibility of developing methods to ensure these conditions to achieve the goals of innovative development of heat supply.

Conclusions. The proposed management tool for the innovative development of the heat supply sector makes it possible to implement strategic prospects for its development in the focus of resource and energy conservation based on the use of innovative materials, technologies and control systems.

KEYWORDS: fuel and energy complex, heat power engineering, heat supply, innovations, innovative development of heat supply, energy conservation, resource conservation

FOR CITATION: Glazkova V.V., Verstin N.A. A conceptual approach to the management of the innovative development of the heat supply sector. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):317-328. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.317-328 (rus.).

Corresponding authors: Valeria V. Glazkova, leram86@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Энергоемкость выступает одним из ключевых показателей, отражающих состояние промышленности страны, динамику ее экономики и инновационной активности. Считается, что снижение показателя свидетельствует об обновлении и модернизации технологических фондов, в том числе за счет внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий, как частного случая инновационных технологий. Несмотря на то, что показатель энергоемкости российского валового внутреннего продукта (ВВП) показывал в последние годы тенденцию к снижению (рис. 1), по данным информационного портала «Мировая статистика энергетики и климата — Ежегодник 2024» в 2023 г. энергоемкость России была на 92 % выше среднемирового показателя¹. С одной стороны, и глобальные темпы снижения энергоемкости замедлились в последние годы: в 2023 г. показатель уменьшился на 1 % по сравнению с 2022 г., в то время как в 2022 г. снижение

глобальной энергоемкости составило 2,5 %. С другой — высокие значения энергоемкости ВВП России определяются среди прочего сильной изношенностью основных фондов и их технологической отсталостью.

Приходится констатировать, что в современных условиях энергетические ресурсы России используются с недостаточной эффективностью. Так, сфера теплоснабжения в России, являющаяся составной и значимой частью топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны, показывает низкую эффективность (рис. 2) и надежность (рис. 3) [1–5].

Рациональное использование энергоресурсов при эффективном функционировании сфер энергетики — одно из приоритетных направлений развития ТЭК России: осуществление процессов энергосбережения и рационального применения ресурсов закреплено Энергетической стратегией РФ на период до 2035 г.², определяющей в качестве одного из важнейших инструментов реализации данных при-

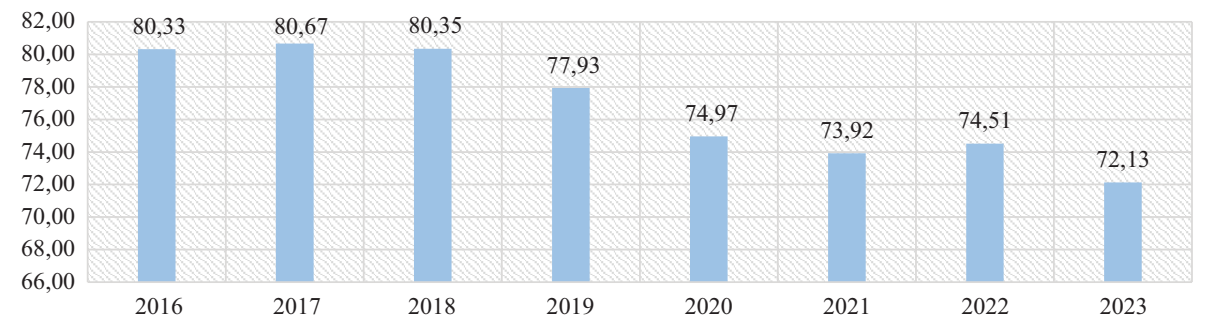


Рис. 1. Энергоемкость ВВП России за период 2016–2022 гг., кг условного топлива на 10 тыс. руб. (составлен авторами на основе материалов информационного портала¹ и Росстата³)

Fig. 1. Energy intensity of Russia’s GDP for the period 2016–2022, kg of conventional fuel per 10 thousand rubles (compiled by the authors on the materials from the information portal¹ and basis of Rosstat data³)

¹ World Energy & Climate Statistics — Yearbook 2024 // Enerdata. URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html>

² Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г. : Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/>

³ Энергоэффективность // Федеральная служба государственной статистики (Росстат). URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11189>

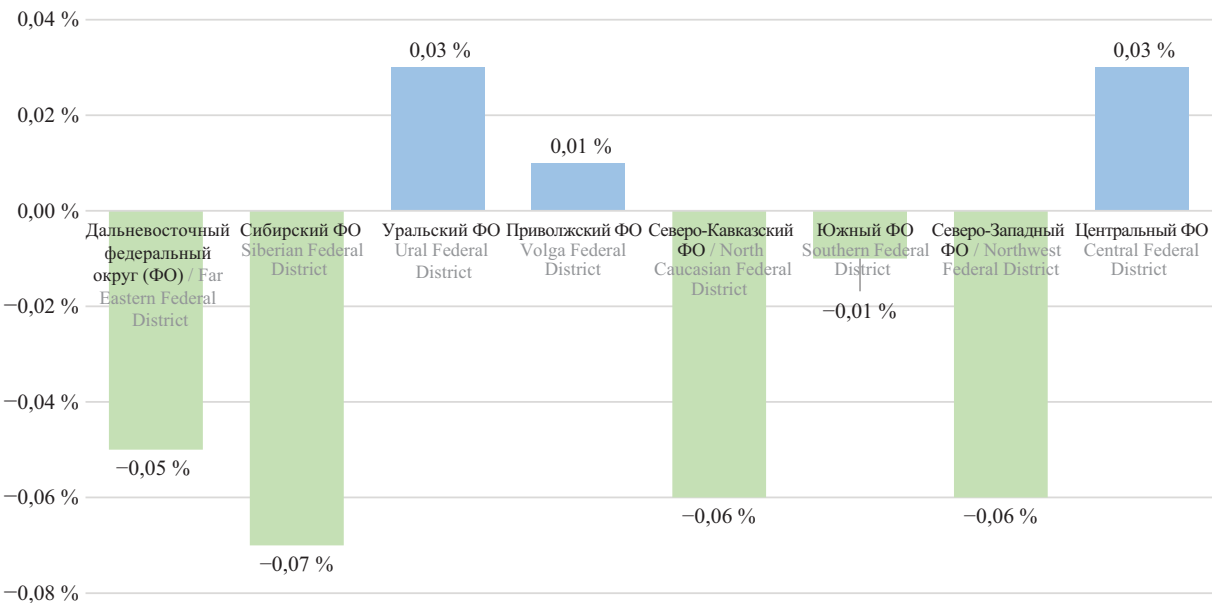


Рис. 2. Рентабельность сферы теплоснабжения в 2021 г. (составлен авторами на основе Отчета о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в РФ в 2021 году⁴)

Fig. 2. Profitability of the heat supply sector in 2021 (compiled by the authors on the basis of a Report on the state of thermal power engineering and district heating in the Russian Federation in 2021⁴)

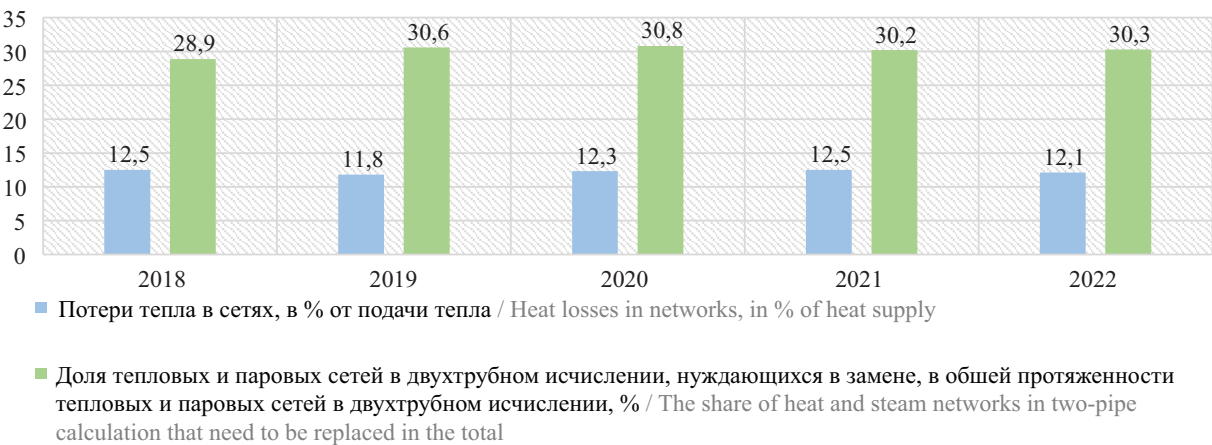


Рис. 3. Потери тепла в сетях и доля сетей, нуждающихся в замене в России за период 2018–2022 г. (составлен авторами на основе материалов Росстата⁵)

Fig. 3. Heat losses in networks and the share of networks in need of replacement in Russia for the period 2018–2022 (compiled by the authors on the basis of Rosstat materials⁵)

оритетных направлений использование инноваций и новых технологий, применение которых в сфере теплоснабжения способствует повышению его надежности за счет динамики снижения аварий на сетях и источниках теплоснабжения⁶. Таким образом, в рассмотренных условиях функционирования и развития теплоснабжения в России необходимо уделять

принципиальное внимание вопросам инновационного развития сферы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические и методические аспекты инновационного развития объекта исследования следует рассматривать сквозь призму одной из центральных

⁴ Отчет о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2021 году. М. : РЭА Минэнерго России, 2022. 111 с.

⁵ Теплоснабжение населенных пунктов по Российской Федерации, годы (1995, 2000, 2004–2022) // Федеральная

служба государственной статистики (Росстат). URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Jkh3.xlsx>

⁶ О теплоснабжении в Российской Федерации : доклад Министерства энергетики Российской Федерации. М., 2020. 26 с.

экономических теорий — теории инноваций. А. Смит в своем главном труде более двухсот лет назад рассматривал научно-технический прогресс (НТП) как средство достижения системой экономического роста⁷. Позднее исследователь М. Туган-Барановский в ходе анализа промышленных кризисов пришел к выводу, что достижения НТП наиболее активно внедряются в ходе спада экономики. Развивая эту идею, отечественный ученый Н.Д. Кондратьев⁸ определил, что наличие инноваций и возможность их внедрения в производство способствуют выходу экономической системы из кризиса. Основоположителем теории инноваций по праву считается Й. Шумпетер⁹, который ввел в научный оборот термин «инновация», определив его содержательные характеристики. Позже, в 1970–1980-х гг., формируются два подхода к теориям инноваций: объектный подход (объект — инновация, сформированная в результате НТП) и процессный подход (рассматривается процесс разработки, внедрения и коммерциализации инновации). Обобщая множество теоретических подходов к определению инноваций, исследователи М.В. Крылова, Ю.Ю. Сулова и А.В. Волошин предложили в зависимости от содержания классифицировать их на подходы, рассматривающие инновации как синоним «нововведения», как результат, как процесс и как систему. Однако все сложившиеся подходы к определению инноваций объединяет мысль, что инновации выступают движущей силой развития, что еще раз подтверждает тезис о необходимости изучать вопросы инновационного развития сферы теплоснабжения в условиях повышения эффективности (включая энергоэффективность) и надежности сферы.

Поскольку в ходе становления теории инноваций многие ученые стремились трактовать инновации по-своему, возникает необходимость подробнее остановиться на понятии инновационного развития, выступающего предметом настоящего исследования. В контексте приоритетов энерго- и ресурсосбережения интерес вызывает подход к определению содержания инновационного развития в соответствии с идеологией гуманистической ноосферной цивилизации, которая как раз определяла, что переход к энергосбережению возможен за счет использования новых технологий, преимущественно принципиально нового характера [6]. С.Ю. Глазьев¹⁰ рассматривал процессы инновационного развития сквозь призму

технологических укладов, считая, что его осуществление возможно через активацию инновационного потенциала наиболее значимых отраслей экономики, к которым, на взгляд авторов, целесообразно относить и энергетику, она, по заявлениям А. Новака, в 2023 г. обеспечила 25 % ВВП России¹¹. В контексте условий реализации инновационного потенциала экономической системы анализировали инновационное развитие и такие ученые, как Е.Е. Никитин, И.С. Комков [7], Е.И. Кривенко, Е.С. Стряпчих, А.В. Михайлова [8] и др. Обобщая подходы к формулировке инновационного развития, в рамках настоящего исследования инновационное развитие теплоснабжения рассматривается как процесс перехода из одного качества в другое, определяемое повышением его эффективности (включая энергоэффективность) и надежности, которое обеспечивается через инновационное развитие основных субъектов теплоснабжения — организаций теплоснабжения.

Один из важнейших вопросов инновационного развития организации лежит в плоскости установления условий, ему способствующих, которые включают как условия внешней среды, так и внутренние возможности хозяйствующего субъекта осуществлять инновационное развитие (рис. 4). Условия внешней среды, которые способствуют инновационному развитию, в экономической и управленческой литературе принято называть инновационным климатом, структура которого формируется из условий макросреды, оказывающих опосредованное влияние на процессы инновационного развития организации, и мезосреды, определяемой ближайшим окружением организации и целями участников этого окружения, формируемыми в контексте инновационного развития организации. Распространенным в управленческой литературе методом определения перечня участников мезосреды и их основных интересов по отношению к организации является стейкхолдерский подход, который нашел отражение в работах Р. Акоффа¹², Э.Р. Фримена¹³, М. Додда¹⁴, А. Берле¹⁵, Т.М. Джонса, С.Л. Хилла¹⁶, О. Уильямсона¹⁷, Дж. По-

⁷ Смит А. Исследование о природе и причинах богатства народов. М. : Соцэкгиз, 1962. 684 с.

⁸ Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. М. : Экономика, 2002. С. 390–391.

⁹ Шумпетер Й. Теория экономического развития : исследование предпринимательской прибыли, капитала, кредита, процента и цикла конъюнктуры. М. : Прогресс, 1982. 455 с.

¹⁰ Глазьев С.Ю. Рынок в будущее: Россия в новых технологическом и мирохозяйственном укладах. М. : Книжный мир, 2018. 765 с.

¹¹ Вице-премьер РФ Новак: доходы от энергетики составили в 2023 году 25 % от ВВП // РИАМО. URL: <https://riamo.ru/news/ekonomika/vitse-premer-rf-novak-dohody-ot-energetiki-sostavili-v-2023-godu-25-ot-vvp/>

¹² Акофф Р. Акофф о менеджменте. СПб. : Питер, 2002. 448 с.

¹³ Freeman R.E. Strategic Management: a stakeholder approach. Boston. 1984. 275 p.

¹⁴ Dodd E.M. For whom are corporate managers trustees? // Harvard Law Review. 1932. No. 45. Pp. 1145–1163.

¹⁵ Berle A.A. For whom corporate managers are trustees // Harvard Law Review. 1932. No. 45. Pp. 1365–1372.

¹⁶ Hill Ch.W.L., Jones T.M. Stakeholder-agency theory // Journal of Management Studies. 1992. No. 29 (2). Pp. 131–154.

¹⁷ Уильямсон О.И. Экономические институты капитализма: фирмы, рынки, «отношенческая» контрактация. СПб. : Лениздат, 1996. 702 с.

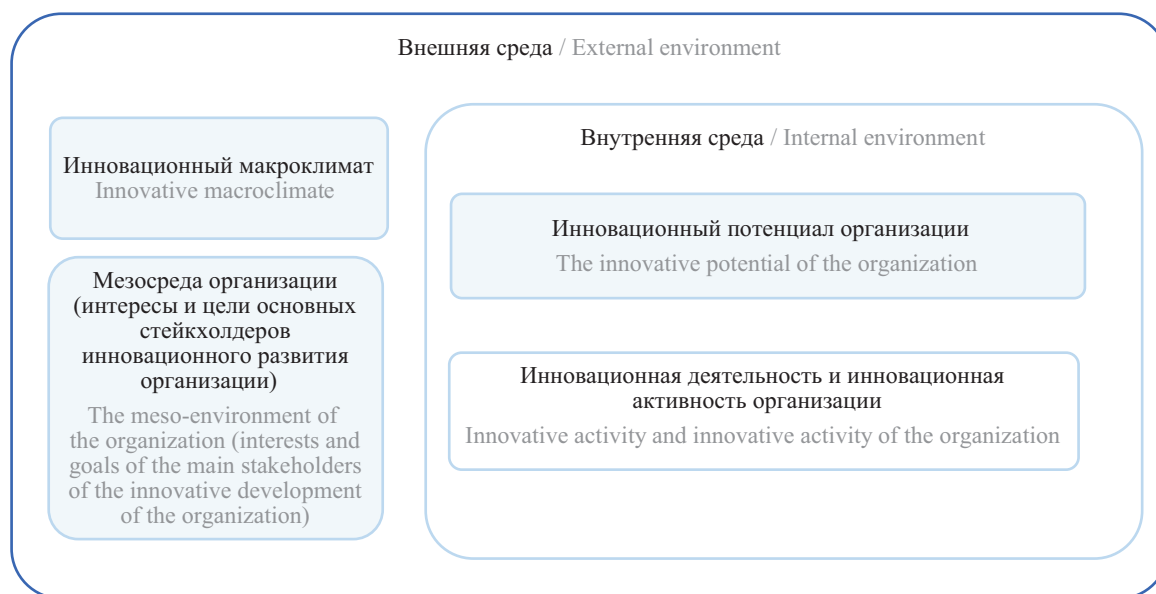


Рис. 4. Влияние условий внешней и внутренней среды на инновационное развитие организации (составлен авторами)

Fig. 4. The influence of external and internal environment conditions on the innovative development of the organization (compiled by the authors)

ста, Л. Престона¹⁸, С. Сакса¹⁹ и других ученых, заявлявших о важности учета отношений организации с ее основными стейкхолдерами для повышения эффективности ее функционирования [9].

Действия условий внешней инновационной среды проявляются на инновационном потенциале организации, умелое использование которого приводит к повышению ее инновационной активности и инновационной деятельности. Инновационная деятельность характеризует эффективность выполнения процессов инновационного развития, состав которых может отличаться в зависимости от выбора модели осуществления инноваций в организации: модели, предусматривающей собственную разработку нововведений (проектный подход), или модели, связанной с приобретением инноваций у сторонней организации (процессный подход) [10–12]. Интенсивность инновационной деятельности в организации характеризуется ее инновационной активностью, ключевым условием реализации которой выступает достаточный инновационный потенциал организации [13–15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из описанной методологии инновационного развития организации концептуальный подход к управлению инновационным развитием

организаций теплоснабжения представим в виде следующей модели (рис. 5), включающей подготовительный, реализационный и заключительный этапы инновационного развития.

Подготовительный этап инновационного развития следует начинать с анализа условий внешней и внутренней среды организации (инновационного климата и инновационного потенциала). Анализ инновационного климата традиционно рассматривается в контексте экономических, политических, социальных и технологических факторов внешней среды организации. На рис. 6 представлены факторы инновационного климата, имеющие значение для инновационного развития сферы теплоснабжения. Результатом анализа инновационного климата сферы теплоснабжения должна стать оценка указанных условий, выраженная количественным показателем (к примеру, интегральная балльная оценка степени влияния факторов), позволяющим сделать вывод о состоянии инновационного климата: способствует он или, напротив, создает барьеры для инновационного развития с точки зрения текущего положения дел и динамики (в сравнении с предыдущими периодами). Перечисленные на рис. 6 факторы инновационного климата оказывают прямое воздействие на скорость появления инноваций на энергетическом рынке, включая сферу теплоснабжения, на их доступность, уровень развития прикладных научных исследований в отрасли, что, в свою очередь, определяет характер взаимоотношений с поставщиками, потребителями и другими группами стратегического влияния развития сферы теплоснабжения, к которым, в первую очередь, необходимо отнести органы государственной и муниципальной власти, потребителей, а также акционеров организаций теплоснабжения

¹⁸ Donaldson T., Preston L.E. The stakeholder theory of the corporation: concepts, evidence, and implications // The Academy of Management Review. 1995. No. 20 (1). Pp. 65–91.

¹⁹ Post J.E., Preston L.E., Sachs S. Managing the extended enterprise: the new stakeholder view // California Management Review. 2002. No. 45 (1). Pp. 5–28.



Рис. 5. Концептуальный подход к управлению инновационным развитием организаций теплоснабжения (составлен авторами)

Fig. 5. Conceptual approach to the management of innovative development of heat supply organizations (compiled by the authors)

и инвесторов. Разделяя мнение о том, что «стейкхолдерская теория является менеджерской в широком смысле этого слова» [9, 16, 17], идентификация и описание поведения основных стейкхолдеров исследуемой системы способствует формированию управленческих инструментов, позволяющих реализовывать на практике установленные цели системы (в контексте настоящего исследования — цели инновационного развития теплоснабжения) во взаимодействии с целями основных держателей интересов, достигая эффекта синергии для всех участников и заинтересованных лиц процесса инновационного развития сферы теплоснабжения.

Вместе с тем только благоприятных условий внешней среды для инновационного развития организации недостаточно. Наличие необходимого инновационного потенциала и составляющих его структурных элементов также создает предпосылки к эффективному инновационному развитию хозяйствующего субъекта. На основе критического анализа сложившихся подходов к оценке инновационного по-

тенциала организаций для определения данного показателя применительно к организациям теплоснабжения необходимо выделить кадровый, финансовый, научно-технический и производственно-технологический потенциал организаций теплоснабжения, совокупность которых будет формировать интегральный показатель инновационного потенциала (рис. 7). Преимуществом предложенного подхода к оценке инновационного потенциала организаций теплоснабжения является то, что он даст возможность определять как отдельные составляющие инновационного потенциала и выделять в общей структуре направления с низким значением частного потенциала для дальнейшего приложения управленческого решения к определенному направлению его развития, так и сравнивать организации по уровню инновационного потенциала, представляющего совокупность частных потенциалов (интегральный показатель инновационного потенциала). Для количественной шкалы оценки возможно использовать подход с разбивкой шкалы от 0 до 100 % на 3 промежутка, где интервал от 0 до 30 % отражает

Политические факторы / Political factors	• степень разработанности государственной инновационной политики / the degree of development of the state innovation policy; • меры и интенсивность мероприятий государственной инновационной политики / measures and intensity of measures of the state innovation policy; • поддержка инновационной инфраструктуры со стороны государства / government support for innovation infrastructure; • поощрение кооперационных сетей со стороны государства / encouragement of cooperative networks by the State; • развитие инструментов государственно-частного партнерства / development of public-private partnership instruments; • степень содействия повышению энергоэффективности экономики / the degree of assistance in improving the energy efficiency of the economy
Экономические факторы / Economic factors	• наличие налоговых преференций в случае проведения научно-исследовательских разработок и внедрения инновационной продукции / availability of tax preferences in the case of research and development and the introduction of innovative products; • степень развитости и восприимчивости рынка к инновациям / the degree of development and susceptibility of the market to innovation; • степень развитости предпринимательства и бизнес-среды / the degree of development of entrepreneurship and the business environment; • наличие организаций инновационной и поддерживающей инфраструктуры / availability of innovative and supportive infrastructure organizations; • устойчивость денежной системы страны / stability of the country's monetary system
Социальные факторы / Social factors	• рост общественного внимания к проблемам функционирования и развития теплоснабжения / the growth of public attention to the problems of functioning and development of heat supply; • социальная активность и мобильность потребителей / social activity and consumer mobility; • увеличение количества домохозяйств и потребителей энергии / increasing the number of households and energy consumers
Технологические факторы / Technological factors	• степень развитости науки и техники (уровень научно-технического прогресса) / the degree of development of science and technology (the level of scientific and technological progress); • сложившийся технологический и энергетический уклад / the established technological and energy structure; • степень технологического развития ведущих отраслей страны / the degree of technological development of the country's leading industries; • появление и развитие новых производственных технологий / the emergence and development of new production technologies; • степень развитости энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий / the degree of development of energy-saving and resource-saving technologies; • максимальное использование сырья и материалов / maximum use of raw materials and supplies; • спрос промышленности на результаты исследований и разработок и высокие технологии / industry demand for research and development results and high technologies

Рис. 6. Факторы инновационного климата, оказывающие влияние на развитие сферы теплоснабжения (составлен авторами)

Fig. 6. Factors of the innovation climate influencing the development of the heat supply sector (compiled by the authors)

низкий уровень инновационного потенциала, от 31 до 70 % — средний, более 71 % — высокий.

Вместе с определением условий внутренней среды организаций теплоснабжения, которые способствуют ее инновационному развитию, на подготовительном этапе инновационного развития следует рассматривать также готовность организации к внедрению инноваций. В первую очередь, с точки зрения производственно-технологической оценки, в организации теплоснабжения, которая планирует реализацию инноваций, должна быть технологическая совместимость старых и новых элементов производственной системы. Кроме того, чем выше степень цифровизации и энергоэффективности, тем в большей степени организация готова к инновационному развитию. Финансовая оценка готовности организации

теплоснабжения необходима для оценки степени обеспеченности организации финансовыми ресурсами для осуществления конкретных инноваций. Для целей финансовой оценки в данном случае может использоваться расчет показателей финансовой деятельности и финансовой устойчивости организации. Немаловажной составляющей готовности организации к инновационному развитию служит готовность организационной структуры хозяйствующего субъекта и кадровый потенциал организации, для чего целесообразно проводить анализ адаптивности существующей организационной структуры и структур управления к изменениям, которые будут возникать в организации в ходе внедрения инноваций, оценку организационной культуры, степень компетентности сотрудников и уровень их сопротивления изменениям. Предложенный под-

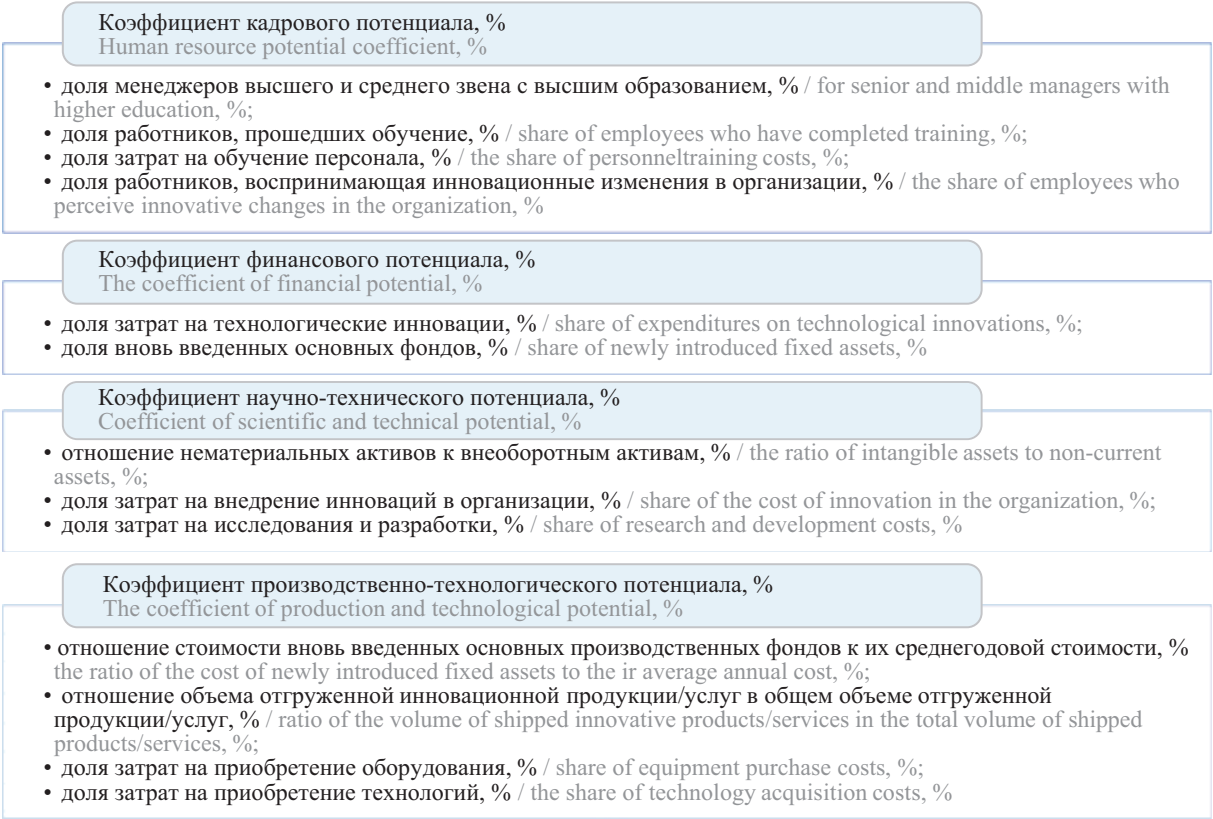


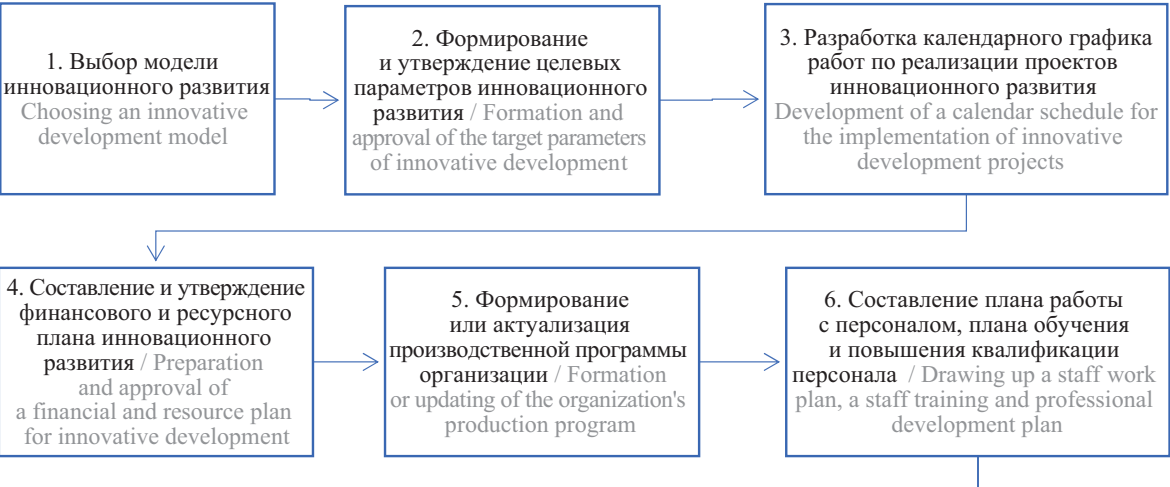
Рис. 7. Составляющие инновационного потенциала организации теплоснабжения (составлен авторами)
Fig. 7. Components of the innovative potential of the organization of heat supply (compiled by the authors)

ход к оценке готовности организаций теплоснабжения к инновационному развитию отличает системность, так как он позволяет с позиций производственно-технологического, организационно-социального и финансового направлений оценить готовность их внутренней среды и сделать соответствующий вывод.

На основе результатов подготовительного этапа инновационного развития теплоснабжения, когда понятны условия этого развития для хозяйствующего субъекта, формируется перечень организационных процессов и конкретных управленческих шагов, направленных на достижение целей инновационного

развития организации. Эти процессы формируют этап реализации инноваций, который для организаций теплоснабжений представим в виде следующей последовательности шагов, отраженной на рис. 8.

Заключительный этап инновационного развития предполагает оценку результатов, в рамках которой исследуется весь процесс работы в ходе инновационных преобразований и анализируется эффективность внедрения инноваций. С учетом целей основных стейкхолдеров инновационного развития теплоснабжения в качестве направлений эффектов от данного процесса следует выделить финансовый и экономиче-



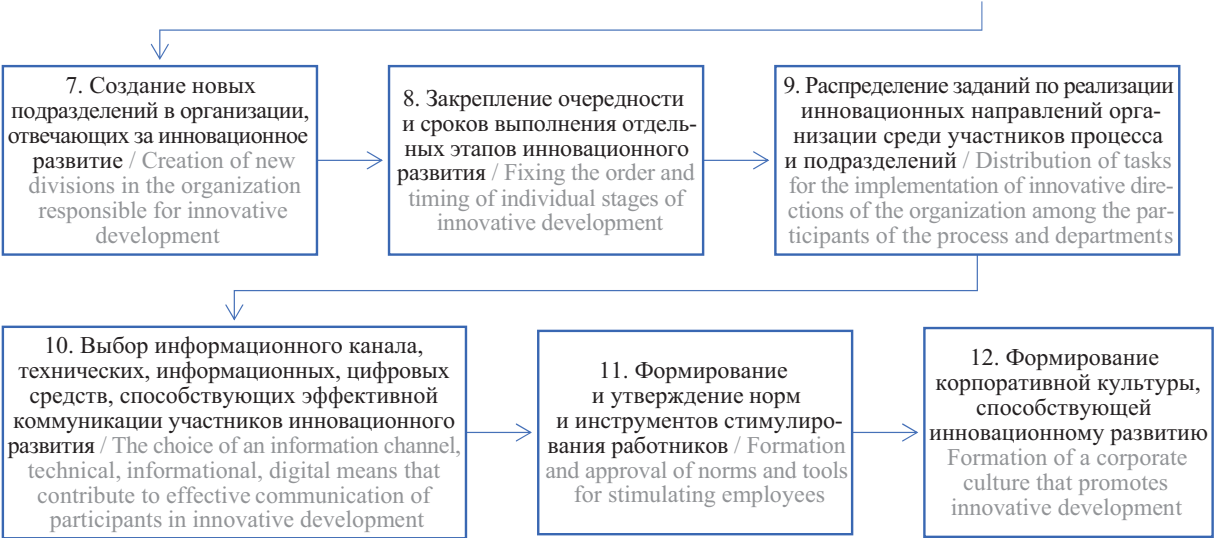


Рис. 8. Этапы управления реализацией инновационного развития организаций теплоснабжения (составлен авторами)
Fig. 8. Stages of management of the implementation of innovative development of heat supply organizations (compiled by the authors)

Соотношение направления эффекта от инновационного развития теплоснабжения и интересов основных стейкхолдеров (составлена авторами)
The ratio of the direction of the effect of the innovative development of heat supply and the interests of the main stakeholders (compiled by the authors)

Стейкхолдер / Stakeholder	Направление эффекта / The direction of the effect			
	Экономический эффект Economic effect	Финансовый эффект Financial effect	Бюджетный эффект Budget effect	Социальный эффект Social effect
Органы государственной и муниципальной власти State and municipal authorities				
Акционеры и инвесторы / Holders and investors				
Потребители / Consumers				

ские эффекты, бюджетный, а также социальный эффект (табл.). Повышение надежности, эффективности и энергетической безопасности теплоснабжения в ходе инновационного развития происходит за счет уменьшения дефектов системы, увеличения межремонтных сроков и сроков службы, расширения перспективных зон, строительства и ввода в эксплуатацию новых объектов теплоснабжения, повышения энергетической эффективности системы теплоснабжения и удовлетворенности потребителей услугами теплоснабжения.

Исследование практических примеров внедрения инноваций в системы теплоснабжения позволяет сделать вывод, что модернизация тепловых сетей с использованием передовых технологий (например, систем оперативного дистанционного контроля, контрольно-измерительных приборов и автоматики) и новых материалов, отличающихся более высокими свойствами износостойкости (например, применяемые ПАО «МОЭК» трубопроводы из высокотемпературных полимерных материалов, трубопроводы в пенополиуретановой изоляции), приводит к сокращению потерь тепловой

энергии и экономии ресурсов²⁰. Таким образом, инновационное развитие теплоснабжения способствует повышению функционирования сферы и достижению целей основных заинтересованных сторон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный в исследовании концептуальный подход к управлению инновационным развитием сферы теплоснабжения позволяет конкретизировать условия макро- и микросреды, способствующие инновационному развитию сферы теплоснабжения, определяя возможность разработки методов обеспечения данных условий для достижения целей инновационного развития теплоснабжения, выраженных в повышении надежности и эффективности (включая энергоэффективность) сферы. Использование энергосберегающих технологий, основанных на применении инновационных материалов, автоматизированных

²⁰ Публичный годовой отчет ПАО «МОЭК» за 2019–2022 гг. URL: <https://www.moek.ru/akcioneram/shareinfo/godovye-otchety/>

и цифровых систем управления, становится одним из ключевых направлений инновационного развития сферы теплоснабжения, так как позволяет минимизировать теплопотери и существенно сокращать затраты энергии при сохранении комфортности температурного режима в помещении и предпочтений потребителей услуг теплоснабжения. Многие исследователи в области развития теплоснабжения (Н.Г. Верстина, Е.Г. Евсеев, О.Ф. Цуверкалова [4, 5]; Е.Ю. Головина, Е.В. Самаркина, Н.Е. Буйнов, М.В. Евлоева [18]; В.В. Доржиева [19] и др.) отмечают, что инновационное развитие является драйвером повышения эффективности, надежности и экономичности организаций ТЭК, включая организации сферы теплоснабжения [20]. Вместе с тем исследователи А.А. Ковалев и Л.Н. Проскурякова [21] утверждают, что одним из барьеров инновационного развития теплоснабжения является то, что большинство отече-

ственных инновационных разработок в этой области не получили широкого коммерческого использования и дальнейшего применения в организациях теплоснабжения, что определяется низким техническим уровнем рассматриваемой сферы. Кроме того, тормозом процессов энергосбережения в теплоснабжении становится стремление производителей тепла продать его большее количество для повышения доходов, и здесь цели собственников организаций теплоснабжения вступают в противотечение с органами государственной и муниципальной власти и потребителями. В этом отношении важную роль должно взять на себя государство, с одной стороны, расширяя программы, направленные на обеспечение энергосбережения в отраслях ТЭК; с другой — создавая благоприятный инновационный климат, способствующий вовлеченности бизнеса в решение задач государственной энергетической политики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Verstina N., Solopova N., Taskaeva N., Meshcheryakova T., Shchepkina N.* A new approach to assessing the energy efficiency of industrial facilities // *Building*. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 191. DOI: 10.3390/buildings-12020191
2. *Zhu L., Zheng W., Zhong Z., Gong Zh., Guo J.* Development prospect of heat supply and peak shaving of nuclear power units in Shandong power grid // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 375. P. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202337502002
3. *Sun Yu., Li X., Wei W., Xue H., Wang W., Deng S.* Development of a variable water temperature control method for air source heat pump based on the supply-demand balance // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52. P. 102366. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102366
4. *Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O.* Strategic planning of construction and reconstruction of the facilities of the heat supply systems with the use of scenario approach // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. P. 05028. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305028
5. *Evseev E., Kisel T.* Integrated efficiency evaluation of the heat-supplying enterprises activity // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. P. 01024. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401024
6. *Glazkova V.V.* Principles of ecological and economic management of innovative development of heat supply // *Springer Proceedings in Business and Economics*. 2023. Pp. 211–221. DOI: 10.1007/978-3-031-30498-9_19
7. *Nikitin Ye.Ye., Komkov I.S.* An integrated approach to the development of plans for transformation of electrical and heat supply systems // *Energy Technologies & Resource Saving*. 2022. Issue 2. Pp. 4–16. DOI: 10.33070/etars.2.2022.01
8. *Кривенко Е.И., Стряпчих Е.С., Михайлова А.В.* Направления инновационного развития предприятий на основе управленческого инструментария // *Экономика и предпринимательство*. 2016. № 10–3 (75). С. 327–331. EDN WXMEEJ.
9. *Глазкова В.В.* Стейкхолдерский подход к инновационному развитию единых теплоснабжающих организаций // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 9. С. 1264–1275. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1264-1275. EDN JJXZYH.
10. *Wang Z., Zhao M.* The evolution of urban physical education development model and its innovative development strategy // *Educational Administration: Theory and Practice*. 2023. Vol. 29. Issue 4. Pp. 144–158. DOI: 10.52152/kuvey.v29i4.854
11. *Kostyuchenko T.N., Gracheva D.O., Telnova N.N., Tenishchev A.V., Cheremnykh M.B.* Assessment of efficiency and production risks in crop production innovative development // *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*. 2022. Pp. 411–418. DOI: 10.1007/978-981-16-8731-0_40
12. *Korotkiy I.A., Neverov E.N., Korotkaya E.V., Korotkih P.S.* Development of innovative technology for processing secondary raw materials in the meat industry // *Nexo Revista Científica*. 2022. Vol. 35. Issue 3. Pp. 759–770. DOI: 10.5377/nexo.v35i03.15005
13. *Gretchenko A.A., Petrova T.A., Rafaeva A.P.* The role of corporate culture in the innovative activity of the organization // *Scientific and analytical journal Science and Practice of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2024. Vol. 16. No. 1 (53). С. 32–39. EDN NCMEXF.
14. *Labunska S., Pylypenko A., Sobakar M., Filipová L., Hajnišová E.* Enterprises' innovative activity management oriented to their market value increase // *Entrepreneurship*

and Sustainability Issues. 2024. Vol. 11. No. 3. Pp. 238–245. DOI: 10.9770/jesi.2024.11.3(16). EDN GCRINL.

15. Huseynova A.D.Q., Mazanova O.I.Q. Multifactor model for assessing innovative potential based on fuzzy set theory // Science, technologies, innovation. 2024. No. 1 (29). Pp. 83–91. DOI: 10.35668/2520-6524-2024-1-09. EDN BEUSGN.

16. Попов С.А., Фомина Л.Л. От теории стейкхолдеров к реализации концепции общих ценностей // Российское предпринимательство. 2013. № 2 (224). С. 60–65. EDN PVRJDJ.

17. Плотников А.В. Сравнение содержания стейкхолдерских подходов в управлении // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11. № 12. С. 2695–2704. DOI: 10.18334/epp.11.12.113929. EDN VHCZQI.

18. Головина Е.Ю., Самаркина Е.В., Буйнов Н.Е., Евлоева М.В. Цифровизация и цифровая трансформация теплоэнергетики как фактор повышения эффектив-

ности тепловой инфраструктуры // Теплоэнергетика. 2022. № 6. С. 3–16. DOI: 10.1134/S0040363622060042. EDN FJUVAB.

19. Доржиева В.В. Цифровая трансформация топливно-энергетического комплекса России: приоритеты и целевые ориентиры развития // Креативная экономика. 2021. Т. 15. № 11. С. 4079–4094. DOI: 10.18334/ce.15.11.113802. EDN LAFKFO.

20. Babych S., Kryvda V., Zhanko K., Zubak V., Suvorov V. Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure // Energy Engineering and Control Systems. 2023. Vol. 9. № 2. Pp. 119–130. DOI: 10.23939/jeecs2023.02.119. EDN UJMFUE.

21. Ковалев А.А., Проскуракова Л.Н. Инновации в российском теплоснабжении: возможности, барьеры, механизмы // Форсайт. 2014. Т. 8. № 3. С. 42–57. DOI: 10.17323/1995-459x.2014.3.42.57. EDN SVQSIX.

Поступила в редакцию 6 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Валерия Викторовна Глазкова — доктор экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru;

Николай Александрович Верстин — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1213722, ORCID: 0000-0001-9798-7777; verstinnick@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Verstina N., Solopova N., Taskaeva N., Meshcheryakova T., Shchepkina N. A new approach to assessing the energy efficiency of industrial facilities. *Building*. 2022; 12(2):191. DOI: 10.3390/buildings12020191

2. Zhu L., Zheng W., Zhong Z., Gong Zh., Guo J. Development prospect of heat supply and peak shaving of nuclear power units in Shandong power grid. *E3S Web of Conferences*. 2023; 375:02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202337502002

3. Sun Yu., Li X., Wei W., Xue H., Wang W., Deng S. Development of a variable water temperature control method for air source heat pump based on the supply-demand balance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022; 52:102366. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102366

4. Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O. Strategic planning of construction and reconstruction of the facilities of the heat supply systems with the use of scenario approach. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:05028. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305028

5. Evseev E., Kisel T. Integrated efficiency evaluation of the heat-supplying enterprises activity. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:01024. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401024

6. Glazkova V.V. Principles of Ecological and Economic Management of Innovative Development of Heat Supply. *Springer Proceedings in Business and Economics*. 2023; 211-221. DOI: 10.1007/978-3-031-30498-9_19

7. Nikitin Ye.Ye., Komkov I.S. An integrated approach to the development of plans for transformation of electrical and heat supply systems. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2022; 2:4-16. DOI: 10.33070/etars.2.2022.01

8. Krivenko E.I., Stryapchih E.S., Mikhailova A.V. Directions of innovative development of enterprises on the basis of the management tools. *Economics and Entrepreneurship*. 2016; 10-3(75):327-331. EDN WXMEJ. (rus.).

9. Glazkova V.V. Stakeholder approach to the innovative development of unified heat supply organizations.

Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(9):1264-1275. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1264-1275. EDN JJXZYH. (rus.).

10. Wang Z., Zhao M. The evolution of urban physical education development model and its innovative development strategy. *Educational Administration: Theory and Practice*. 2023; 29(4):144-158. DOI: 10.52152/kuey.v29i4.854

11. Kostyuchenko T.N., Gracheva D.O., Telnova N.N., Tenishchev A.V., Cheremnykh M.B. Assessment of efficiency and production risks in crop production innovative development. *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*. 2022; 411-418. DOI: 10.1007/978-981-16-8731-0_40

12. Korotkiy I.A., Neverov E.N., Korotkaya E.V., Korotkih P.S. Development of innovative technology for processing secondary raw materials in the meat industry. *Nexo Revista Científica*. 2022; 35(3):759-770. DOI: 10.5377/nexo.v35i03.15005

13. Gretchenko A.A., Petrova T.A., Rafaeva A.P. The role of corporate culture in the innovative activity of the organization. *Scientific and analytical journal Science and Practice of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2024; 16(1):(53):32-39. EDN NCMEXF.

14. Labunska S., Pylypenko A., Sobakar M., Filipová L., Hajnišová E. Enterprises' innovative activity management oriented to their market value increase. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2024; 11(3):238-245. DOI: 10.9770/jesi.2024.11.3(16). EDN GCRINL.

15. Huseynova A.D.Q., Mazanova O.I.Q. Multifactor model for assessing innovative potential based on fuzzy set

theory. *Science, technologies, innovation*. 2024; 1(29):83-91. DOI: 10.35668/2520-6524-2024-1-09. EDN BEUSGN.

16. Popov S.A., Fomina L.L. From the theory of stakeholders to implementation of the concept of shared values. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2013; 2(224):60-65. EDN PVRJDJ. (rus.).

17. Plotnikov A.V. Comparison of stakeholder approaches in management. *Journal of Economics, entrepreneurship and law*. 2021; 11(12):2695-2704. DOI: 10.18334/epp.11.12.113929. EDN VHCZQI. (rus.).

18. Golovina E.Y., Samarkina E.V., Buinov N.E., Evloeva M.V. Digitalization and digital transformation of the thermal-power industry as a factor of improving the thermal infrastructure efficiency (a review). *Thermal Engineering*. 2022; 6:3-16. DOI: 10.1134/S00403636220-60042. EDN FJUVAB. (rus.).

19. Dorzhieva V.V. Digital transformation of the Russian fuel and energy complex: priorities and development targets. *Creative Economy*. 2021; 15(11):4079-4094. DOI: 10.18334/ce.15.11.113802. EDN LAFKFO. (rus.).

20. Babych S., Kryvda V., Zhanko K., Zubak V., Suvorov V. Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023; 9(2):119-130. DOI: 10.23939/jeecs2023.02.119. EDN UJMFEU

21. Kovalev A.A., Proskuryakova L.N. Innovations in Russian heat supply: opportunities, barriers, mechanisms. *Foresight*. 2014; 8(3):42-57. DOI: 10.17323/1995-459x.2014.3.42.57. EDN SVQSIX. (rus.).

Received September 6, 2024.

Adopted in revised form on September 16, 2024.

Approved for publication on October 30, 2024.

B I O N O T E S: **Valeriya V. Glazkova** — Doctor of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru;

Nikolai A. Verstin — postgraduate student of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1213722, ORCID: 0000-0001-9798-7777; verstinnick@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

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 литературы 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 инициалы.

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.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

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:

Список источников

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 статьи, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

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 Фамилия^{2...}

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 аннотации.**

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 языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² 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 источников 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, указывают, 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.

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:

Артемьева 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.

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.

Bi o n o t e s: **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.

Contribution of the authors: 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. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

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.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

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

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 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

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

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 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

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@mgсу.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@mgсу.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgсу.ru/>



