

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 7
2024**

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

Сквозной номер 188

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 7
2024**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации 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	29.07.2024.
Подписан в свет	31.07.2024.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 20,79. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 218	

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 Заветович 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 «КиберЛенинка», UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science), ResearchBib

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	31.07.2024

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of civil engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Е.П. Шнурникова, С.П. Горзова, В.В. Кононенко
Реконструкция городской застройки с учетом доступности маломобильных групп населения на примере г. Краснодара 1069

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

С.С. Потасьев
Конструкции структурных покрытий в отечественной практике проектирования и способы их монтажа 1079

А.В. Чесноков, В.В. Михайлов
Усовершенствованная методика расчета гибких вант 1091

О.В. Мкртычев, С.Р. Мингазова
Эффективность сейсмоизолирующего скользящего пояса при воздействии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения 1104

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Д.А. Ляшенко, В.А. Перфилов
Наномодифицированная цементная композиция1116

А.Д. Когай, А.В. Пузатова, М.А. Дмитриева, В.Н. Лейцин
Применение цеолита в многокомпонентных мелкозернистых бетонах для строительной 3D-печати 1125

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Е.М. Терихов, А.С. Аншаков
Исследование устойчивости ячеистых конструкций из плоского металлического шпунта 1138

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.М. Фокин, А.В. Ковылин
Теплозвуковая аналогия для исследования теплозвукофизических свойств твердых материалов 1151

Е.Г. Малявина, С.С. Ландырев
Роль сопротивления теплопередаче окна в формировании результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны помещения 1161

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.А. Ершова, С.А. Шишелова, Т.Н. Орловская
Методика делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации 1173

О.О. Донская, Т.Н. Кисель
Анализ основных характеристик современных кампусов 1186

Т.Ю. Овсянникова, О.В. Рабцевич
Межстрановые оценки состояния жилищной сферы на основе развития методологии компаративного анализа 1201

Ю.А. Лаамарти, Е.Г. Дедов, А.А. Николаев
Рынок строительных организаций полного цикла: анализ современного состояния и ключевых тенденций 1217

Требования к оформлению научной статьи 1228

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Elena P. Shnurnikova, Sofya P. Gorzova, Valeria V. Kononenko

**Reconstruction of built-up urban areas taking into account accessibility to limited mobility population groups:
the case of Krasnodar 1069**

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

Sergey S. Potasiev

**Space frame structures in domestic design practice and their installation
methods 1079**

Andrei V. Chesnokov, Vitalii V. Mikhailov

Advanced technique for flexible cable analysis. 1091

Oleg V. Mkrtychev, Salima R. Mingazova

**The efficiency of the seismic isolating sliding belt under the impact of the most unfavourable earthquake
accelerograms. 1104**

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Dmitry A. Lyashenko, Vladimir A. Perfilov

Nanomodified cement composition 1116

Alina D. Kogai, Anastasia V. Puzatova, Maria A. Dmitrieva, Vladimir N. Leitsin

Adding zeolite to multi-component fine-grain concrete used for 3D construction printing 1125

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Egor M. Terikhov, Aleksandr S. Anshakov

Stability analysis of cellular structures made of flat metal sheet piles 1138

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Vladimir M. Fokin, Andrey V. Kovylin

Thermal and acoustic analogy for the study of thermal acoustic physical properties of solid materials. 1151

Elena G. Malyavina, Sergey S. Landyrev

**The role of heat transfer resistance of a window in formation of resulting temperature at the boundary
of habitable space in a room 1161**

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Svetlana A. Ershova, Svetlana A. Shishelova, Tamara N. Orlovskaya

Methodology for delimiting borders of the St. Petersburg agglomeration 1173

Olga O. Donskaya, Tatiana N. Kisel

Analysis of principal characteristics of modern university campuses. 1186

Tatiana Yu. Ovsiannikova, Olga V. Rabtsevich

**Cross-country assessments of the housing sector based on the development of comparative analysis
methodology 1201**

Yulia A. Laamarti, Evgeny G. Dedov, Alexander A. Nikolaev

**The market of full-cycle construction companies: analysis of the current state
and key trends 1217**

Requirements for research paper design 1228

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 721.05:364.692

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1069-1078

Реконструкция городской застройки с учетом доступности маломобильных групп населения на примере г. Краснодара

Елена Павловна Шнурникова, Софья Павловна Горзова,
Валерия Витальевна Кононенко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие комфортной среды для проживания группы лиц, относящихся к инвалидам, является одной из важнейших задач в современном мире. В значительной степени ее реализация зависит от условий проживания инвалидов-колясочников в многоквартирных жилых домах города. Проблема актуальна и ввиду проводимой Специальной военной операции. С учетом этого важно продолжать работу по адаптации жилых домов и созданию более комфортной среды для маломобильных групп населения (МГН).

Материалы и методы. Представлен анализ заселения инвалидов-колясочников в массовой застройке г. Краснодара, их расселения в городе, а также проживания в домах различной этажности. Выявлены противоречия между имеющимися условиями городской застройки и архитектуры среды и потребностями МГН, рассмотрены вопросы их социализации.

Результаты. Предложен список шагов, необходимых для решения проблем условий проживания людей с ограниченными возможностями. В том числе показаны причины, препятствующие лечебно-профилактическому процессу и социализации инвалидов-колясочников, предложены пути их устранения. Приведено теоретическое обоснование принципов архитектурного проектирования зданий с учетом требований их доступности для МГН, даны рекомендации по реконструкции уже имеющихся жилых домов и модернизации городской среды.

Выводы. Описаны методы и способы, с помощью которых возможно решить ряд наиболее важных проблем, касающихся инвалидов-колясочников г. Краснодара, в частности доступной среды для проживания. Проведен анализ уместности заселения людей с ограниченными возможностями в уже имеющейся городской застройке, раскрыты аспекты реконструкции данной архитектурной среды, представлены приемы проектирования зданий, удовлетворяющих требованиям проживания маломобильных граждан. Также проанализирован и определен социальный подход к задаче развития комфортной среды местожительства таких представителей общества с целью интегрировать их в жизнь социума.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектура, жилищное строительство, многоквартирные жилые дома, селитебные зоны, инвалиды-колясочники, реабилитация, социальная инклюзия, адаптация, маломобильные группы населения, инвалиды-колясочники

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шнурникова Е.П., Горзова С.П., Кононенко В.В. Реконструкция городской застройки с учетом доступности маломобильных групп населения на примере г. Краснодара // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1069–1078. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1069-1078

Автор, ответственный за переписку: Софья Павловна Горзова, gorsp-sp04@mail.ru.

Reconstruction of built-up urban areas taking into account accessibility to limited mobility population groups: the case of Krasnodar

Elena P. Shnurnikova, Sofya P. Gorzova, Valeria V. Kononenko

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

ABSTRACT

Introduction. The development of a comfortable living environment for persons with disabilities is one of the most important tasks in the modern world. To a large extent, its implementation depends on housing conditions of wheelchair users, as well as principles of their settlement in multi-apartment residential buildings in cities. Physical barriers in the architectural environment are the most pressing problem hindering rehabilitation and socialization of disabled persons. Uncomfortable housing conditions can hinder therapeutic and preventive care aimed at health improvement, and physical barriers in housing and

yard spaces can hamper the socialization of disabled residents. The problem is more relevant than ever, because due to the ongoing Special Military Operation, the number of physically challenged persons is growing fast. With this in mind, it is important to continue adapting residential buildings for limited mobility population groups and creating a more comfortable environment for all urban residents.

Materials and methods. The article analyzes (1) the way wheelchair users take up residence in large-scale development areas in the post-war Krasnodar, (2) the settlement of wheelchair users in urban districts, (3) the residence of wheelchair users in buildings with a different number of storeys. Contradictions are identified between current urban development conditions and surrounding architecture, on the one hand, and the needs of limited mobility residents, including their socialization, on the other hand. Criteria for selecting design solutions are developed; recommendations are provided for the reconstruction of existing residential buildings, equipping and modernizing the urban environment, raising awareness of problems to be tackled by disabled persons.

Results. A list of steps is proposed to solve problems of housing conditions and principles of resettlement of disabled persons. In particular, factors impeding the treatment, preventive care and socialization of wheelchair users are considered, and their elimination plan is proposed. The article provides a theoretical justification for techniques and principles of architectural design of buildings, taking into account the accessibility of standard residential buildings to limited mobility persons.

Conclusions. The article describes methods and techniques for solving several most important problems of wheelchair users in Krasnodar, in particular, their accessible living environment. The appropriateness of the settlement of disabled persons in the existing urban development and reconstruction of this architectural environment were analyzed; methods for designing buildings that meet the housing requirements of limited mobility persons were presented. Also, a social approach to developing a comfortable living environment for such members of society was formulated and analyzed to ensure their integration into the life of society, equal access to infrastructure, work and education.

KEYWORDS: architecture, housing construction, multi-apartment residential buildings, residential areas, wheelchair users, rehabilitation, social inclusion, adaptation, limited mobility population groups, wheelchair users

FOR CITATION: Shnurnikova E.P., Gorzova S.P., Kononenko V.V. Reconstruction of built-up urban areas taking into account accessibility to limited mobility population groups: the case of Krasnodar. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1069-1078. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1069-1078 (rus.).

Corresponding author: Sofya P. Gorzova, gorsp-sp04@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Физические барьеры в архитектурной среде являются одной из главных причин затруднений в реабилитации и социализации людей с ограниченными возможностями. Некомфортные бытовые условия могут препятствовать лечебно-профилактическим мерам по оздоровлению, а физические преграды в жилых помещениях и дворовых пространствах лишают инвалидов свободы передвижения, оставив неизгладимый след на их социализации [1, 2]. С начала 1980-х гг. началась позитивная тенденция в организации комфортной городской среды, которая проявилась в первых исследованиях, проектах и нормативных документах. В г. Краснодаре действует государственная программа «Доступная среда» (далее — государственная программа), которая реализуется с 2015 г., а в настоящее время продлена до 2025¹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В столице Краснодарского края проживает более тысячи инвалидов-колясочников, которые нуждаются в улучшении жилищных условий. Большинство из них сталкиваются с проблемами доступности жилья. Около 19 % живут в безлифтовых домах выше первого этажа, что делает невозможным для них покинуть свою квартиру или свободно перемещаться внутри нее без помощи других лю-

дей [3]. Эти проблемы могут включать узкие проемы, высокие пороги и другие препятствия, которые затрудняют передвижение.

При рассмотрении массовой застройки послевоенного периода Краснодара выявлены наиболее предпочитаемые маломобильными людьми для проживания серии домов:

1. Серия 114-85 или 85 — общесоюзная типовая серия многоквартирных кирпичных жилых домов, этажность домов составляет 5 или 9 этажей, в 9-этажных модификациях предусмотрен один пассажирский лифт и мусоропровод.

2. 111-90 — серия крупнопанельных многосекционных жилых домов индустриального домостроения, отличительной особенностью которых служат балконы и лоджии, расположенные под небольшим углом относительно плоскости фасада. Дома данной серии имеют яркую конструктивную особенность — наличие незадымляемых переходов между лестничной клеткой и лифтовым холлом. В блок-секциях этажностью выше пяти имеется один пассажирский лифт и мусоропровод.

3. П-29 — дома серии чаще всего девятиэтажные, но встречаются и версии домов этажностью от 8 до 12 этажей. Первый этаж жилой и расположен над подвалом. Хорошие теплоизоляционные свойства кирпичных стен в данной серии дополнены наличием лифта.

4. П-49 — первый этаж из девяти чаще всего делали нежилым и отводили под размещение объектов инфраструктуры, предусматривался один пассажирский лифт. Следует обратить внимание, что некоторые дома П-49 возводились из строй-

¹ Государственная программа Краснодарского края «Доступная среда»: утв. постановлением главы администрации (губернатором) Краснодарского края от 12.10.2015 № 969.

материалов, включающих фенол — небезопасное для здоровья человека вещество.

5. В серии II-18 изначально было 8 этажей, потом проектировщики добавили девятый, а позже увеличили высотность зданий до 12 этажей. Этаж дома поделен прилифтовым холлом на два крыла. В доме предусмотрено два пассажирских лифта, есть мусоропровод с загрузочными люками на межэтажной площадке.

6. Серия 1-515/9ш представляет собой многосекционные панельные многоэтажки, в которых секции расположены по рядовому принципу. Первый этаж из девяти всегда жилой, предусматривался один пассажирский лифт. Однако строились и некоторые пятиэтажки этой серии, которые в свою очередь не имели лифтов.

7. 1-464 (121) — дома этой серии многосекционного типа, наиболее часто встречаются 4-секционные. Дом состоит из торцевых и рядовых секций. Высота дома чаще всего 5 этажей, первый из которых — жилой. Лифты в таком типе не предусматривались. Но в составе модифицированной серии появились четырехкомнатные квартиры, санузлы стали чаще выполнять раздельными, а также появились дома от 9 до 16 этажей с лифтом и мусоропроводом.

Большая часть инвалидов проживает в 9–12-этажных домах серий II-49, II-18, 1-515/9Ш и 121, которые хоть и характерны плотной планировкой небольших помещений и узких проходов, но также являются одними из немногих серий тех лет, которые имеют несущие стены внутри квартиры

и не препятствующее взаиморасположение санузла и кухни, что позволяет работать с перепланировкой жилища. Для инвалидов-колясочников подходят квартиры с улучшенной планировкой, которые имеют большие площади [4].

Наибольшая численность инвалидов-колясочников зафиксирована в Центральном (29,5 %) и Прикубанском (28,3 %) районах, наименьшая — в Западном (6,59 %) и Карасунском (5,2 %) округах города (рис. 1)².

Большая часть населения инвалидов-колясочников (около 54 %) проживают в многоэтажных домах от 6 до 10 этажей; в домах средней этажности в 3–5 этажей проживает 39,3 %; в домах повышенной этажности до 16 этажей — 4,2 %; в малоэтажных домах — 1,8 %; в высотных домах более 16 этажей — 0,7 % (рис. 2)².

Большинство инвалидов-колясочников проживают на первых (23,9 %) и вторых (24,2 %) этажах, на третьем — около 9,2 %, далее количество проживающих убывает по мере повышения этажности (рис. 3)².

Авторами рассмотрен методический документ РМД 35-17–2012 г. Санкт-Петербурга, в котором представлено практическое руководство по обеспе-

² Проблемы обеспечения доступности лиц с ограниченными возможностями к их жилым помещениям и общему имуществу в многоквартирных домах в Краснодарском крае : доклад Уполномоченного по правам человека в Краснодарском крае. Краснодар, 2021. 9 с.



Рис. 1. Схема расселения инвалидов-колясочников по районам и округам в г. Краснодар

Fig. 1. The plan of settlement of wheelchair users in districts and municipalities of Krasnodar

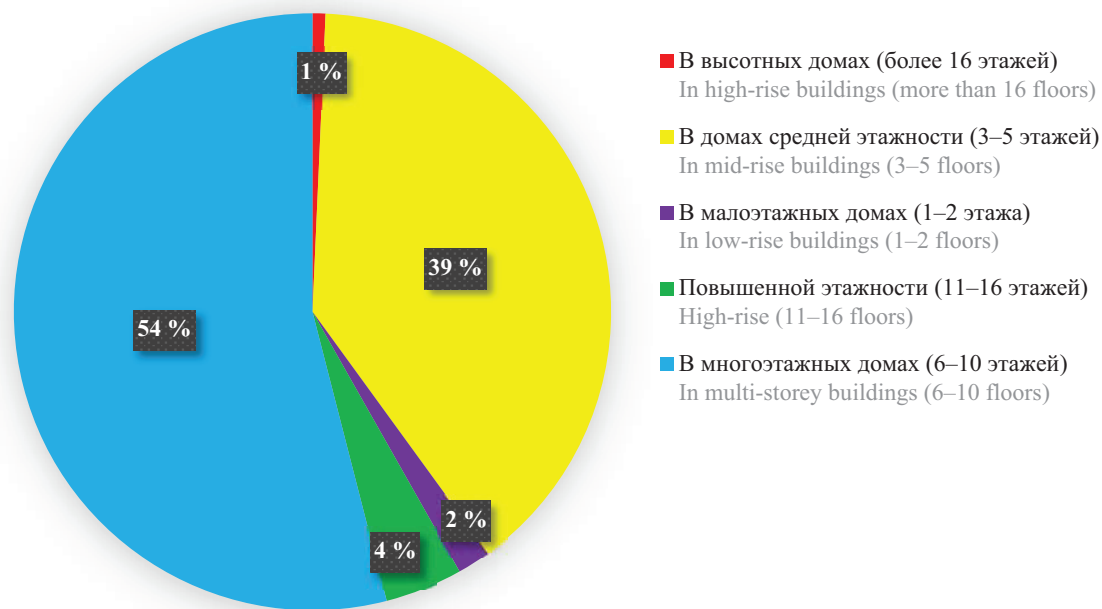


Рис. 2. Диаграмма соотношения инвалидов-колясочников, проживающих в домах различной этажности
Fig. 2. The diagram showing the percentage of wheelchair users living in buildings with a different number of storeys

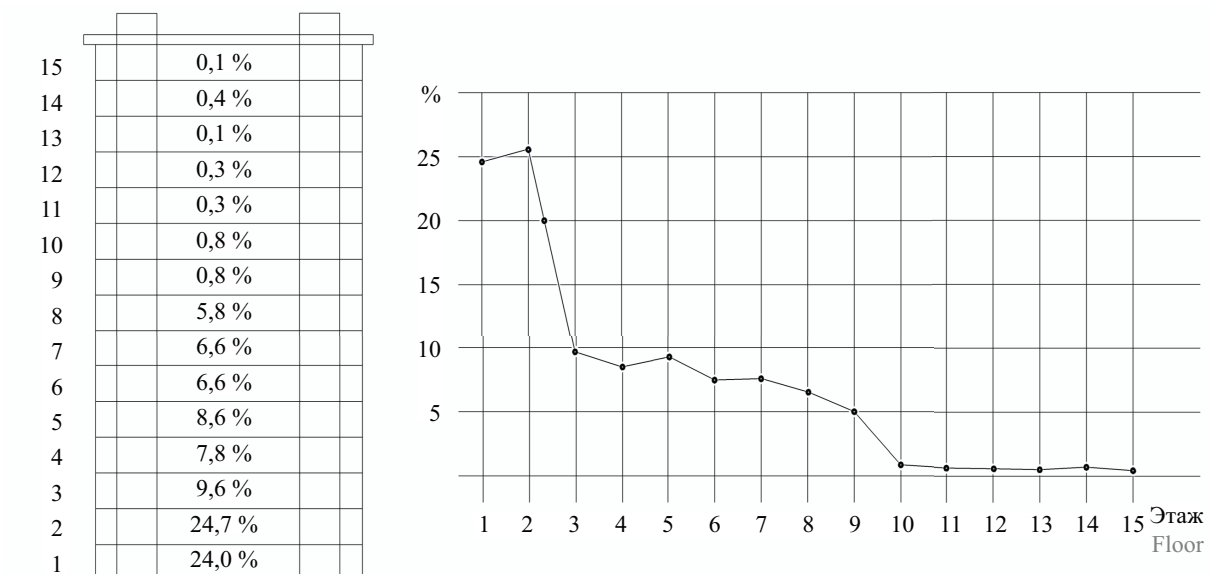


Рис. 3. Диаграмма соотношения количества инвалидов-колясочников, проживающих на различных уровнях этажности
Fig. 3. The diagram showing the ratio between the number of wheelchair users living on different floors

чению доступности типовых жилых домов для маломобильных групп населения (МГН), построенных по типовым проектам в 60–80-х гг. XX в. Данный документ содержит рекомендации по применению проектных решений, обеспечивающих доступность и удобство для инвалидов-колясочников и других МГН³. В целях успешного решения этой задачи не-

обходимо учитывать конструктивные параметры зданий, характеристики несущих конструкций, наличие лифта или возможность установки подъемных устройств [5, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рекомендуется рассчитывать жилые комнаты для проживания инвалидов в жилых домах массовой застройки на одного или двух человек (мать с ребенком-инвалидом, член семьи при немощном инвалиде, пожилая пара). Размеры жилых помеще-

³ РМ Д 35-17–2012 Санкт-Петербург. Рекомендуемые для повторного применения проектные решения по обеспечению доступности для инвалидов и других маломобильных групп населения жилых домов, построенных в Санкт-Петербурге по типовым проектам в 60–80 годах XX века. 2013. 141 с.

ний в квартирах для инвалидов с разными потребностями⁴:

- не менее 12 м² для тех, кто передвигается на кресле-коляске;
- не менее 16 м² для тех, кто занимается индивидуальной трудовой деятельностью.

Для обеспечения комфортного проживания семей с инвалидами на креслах-колясках в квартирах на первом этаже необходимо предусмотреть возможность входа с придомовой территории и выхода на расширенный приквартирный участок. Для этого рекомендуется увеличить минимальную площадь квартиры на 12 м² и обеспечить отдельный вход, оснащенный приквартирным тамбуром с устройством подъемника. В квартирах для проживания инвалидов, передвигающихся на креслах-колясках, следует обеспечить полную свободу их передвижения и разворота кресла-коляски на 360° в холлах и подъездах [7]. Жилая зона для людей с ограниченными возможностями здоровья должна включать жилую комнату, санитарный блок, который может использовать инвалид, а также холл с площадью не менее 4 м² и собственные коммуникации. Общие геометрические параметры санитарного узла и его отдельных зон должны уточняться в каждом конкретном случае в соответствии с удобным перемещением и разворотом на инвалидном кресле-коляске [8].

Важно предусмотреть соответствующее устройство входных узлов, доступность вертикальных и горизонтальных коммуникационных пространств, а также жилых помещений для инвалидов-колясочников [9, 10]. С целью обеспечения доступности зданий для МГН, в том числе инвалидов на колясках, в зданиях необходимо предусматривать:

1) соответствующее потребностям МГН устройство входных узлов в здания (пандуса и/или подъем-

ной платформы перед главным входом в жилое здание);

2) обеспечение доступности вертикальных коммуникаций (оборудование жилых зданий высотой 2 этажа и более лифтом или подъемной платформой с габаритами, обеспечивающими перемещение инвалида-колясочника (с поэтажным лифтовым холлом));

3) в зданиях высотой до 2 этажей допускается использовать наклонные подъемные устройства с платформой;

4) в безлифтовых зданиях проектное решение типового этажа должно при необходимости обеспечивать возможность за счет реконструкционных мероприятий устройства вертикальной подъемной платформы для инвалида-колясочника;

5) обеспечение доступности поэтажных горизонтальных коммуникационных пространств;

6) обеспечение доступности к помещениям общего пользования, посещаемым проживающими в доме (колясочным, кладовым, службам ТСЖ и т.п.);

7) обеспечение доступности к входным зонам в квартиры;

8) надежные пути пожарной эвакуации или защиты от огня, соответствующие параметрам МГН, и дополнительные устройства для их передвижения.

Основная задача — обеспечение беспрепятственного доступа инвалидов на креслах-колясках в многоквартирные жилые здания [11]. Для этого следует предусмотреть соответствующую входную группу помещений, включающую^{5,6}:

1) входной узел: наружный пандус, лестничный марш, входную площадку и тамбур (рис. 4);

⁵ Гарнец А.М., Сигаева Л.В., Домрачева И.Р., Осинская В.Б. Приспособление, реконструкция, капитальный ремонт жилых многоквартирных зданий с обеспечением их доступности для маломобильных групп населения : методическое пособие. М. : ООО «Институт общественных зданий», 2017. 169 с.

⁶ Об утверждении Порядка проведения мониторинга доступности приоритетных объектов и услуг в приоритетных сферах жизнедеятельности инвалидов и других маломобильных групп населения : Приказ Министерства труда и социального развития Краснодарского края от 10.03.2021 № 256.

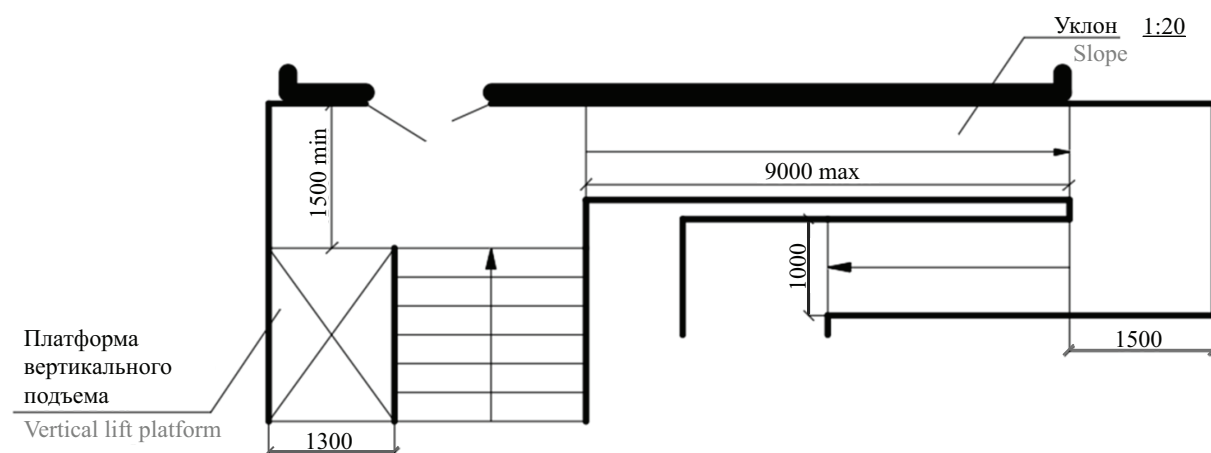


Рис. 4. Пример решения входного узла

Fig. 4. A solution for an entry element

- 2) вестибюльную зону с местом расположения абонентских ящиков;
- 3) лифтовый холл;
- 4) помещения для дежурного по подъезду;
- 5) помещения для хранения колясок.

В зависимости от степени выраженности стойких расстройств функций организма, возникших в результате заболеваний, последствий травм или дефектов, гражданину, признанному инвалидом, устанавливается I, II или III группа инвалидности, а гражданину в возрасте до 18 лет — категория «ребенок-инвалид». С учетом степени утраты способности к передвижению выделяют мобильные, маломобильные и неподвижные группы людей.

С целью обеспечения доступности жилых территорий и земельных придомовых участков для МГН стоит учитывать их специфические потребности и особенности [12]:

- для людей с поражением опорно-двигательного аппарата (ПОДА), на кресле-коляске или с дополнительными опорами следует внести корректировки в параметры проходов и проездов, ограничения по уклонам профиля пути, а также обеспечить высокое качество поверхности дорожек для передвижения. Окружающая среда должна быть оснащена соответствующей визуальной и тактильной информацией;
- для людей с дефектом зрения (ДЗ), в том числе полностью слепых, необходимо предусматривать увеличенные параметры путей передвижения, рассчитанные с учетом пользования тростью, непрерывные ограждения и контрастные ведущие линии;
- поверхность путей передвижения должна быть свободной от препятствий, оборудована необходимой звуковой и тактильной информацией, а также соответствующим освещением;
- для людей с дефектом слуха (ДС), включая полностью глухих, требуется создать специальные элементы городской среды, такие как хорошо различимая визуальная информация и таксофоны для слабослышащих⁷.

Кроме того, реконструкция и модернизация жилых домов, обустройство дворовых пространств и другие мероприятия также необходимы для улучшения жилищных условий МГН [13]. Несмотря на проведенные мероприятия по обеспечению доступности городской среды для людей с ограниченными возможностями, требуется продолжать работу над созданием более доступной среды и с учетом потребностей всех групп населения, включая маломобильные.

⁷ СП 35-105–2002. Реконструкция городской застройки с учетом доступности для инвалидов и других маломобильных групп населения : утв. Постановлением Госстроя РФ от 19.07.2002 № 89. URL: <https://zakonbase.ru/content/nav/64473>

Увеличение ширины пешеходных дорожек, применение контрастных указательных линий и ограждающих поручней, а также создание специальных элементов городской среды являются необходимыми мерами для обеспечения доступности жилых территорий и земельных придомовых участков для МГН, включающих как инвалидов, так и пожилых людей, родителей с детскими колясками [14, 15].

При реконструкции территории следует организовывать универсальные непрерывные пешеходные пути, сопрягающиеся с внешними по отношению к территории транспортными и пешеходными коммуникациями и остановками общественного транспорта⁴. На придомовой территории жилых зданий следует предусматривать:

- площадки перед главным входом в здание, доступные по размерам, уклонам и оснащению;
- специализированные автопарковки для инвалидов, чтобы обеспечить им максимальную доступность;
- специальные детские площадки, а также зоны для выгула собак и собак-поводырей.

Также необходимо предусматривать оборудование входных площадок навесами, водоотводом и возможность подогрева пандусов. Для обеспечения доступности зданий следует использовать временные трансформируемые металлические пандусы или складные металлические пандусы — «инвентарные пандусы», которые допускается применять при невозможности установки стационарного пандуса в стесненных условиях застройки. Требуется оборудовать пешеходные пути визуальной и тактильной информацией, а при необходимости использовать подъемники вертикального и наклонного перемещения для перемещения людей в инвалидной коляске^{2, 8}.

При реконструкции жилых зданий необходимо проектировать дополнительные наземные вестибюли и подъемные устройства, достигающие нулевой отметки первого этажа. Следует применять подъемные платформы с вертикальным перемещением (рис. 5), предназначенные для инвалидов в креслах-колясках и лиц с ограниченными двигательными возможностями. Такие платформы, рассчитанные на подъем до 10 м (4-го этажа), отличаются простотой установки, удобны в эксплуатации. При определенных условиях, когда невозможно применение подъемных платформ вертикального или наклонного перемещения (рис. 6), рекомендуется применять подвесное подъемное устройство наклонного перемещения для транспортировки инвалидов в кресле-коляске на несколько этажей или в пределах одного

⁸ Безбарьерная среда для инвалидов, дорожное освещение и сборка троллейбусов в Краснодаре — в центре внимания еженедельного совещания городских парламентариев. URL: https://krd.ru/gorodskaya-duma/novosti/news_19102021_120632/

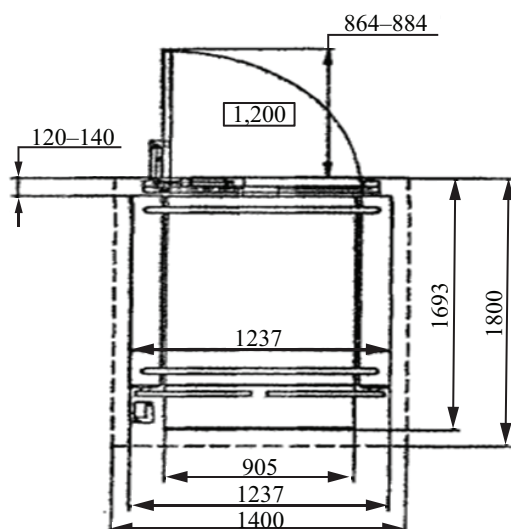


Рис. 5. Пример платформы вертикального подъема
Fig. 5. A vertical lift

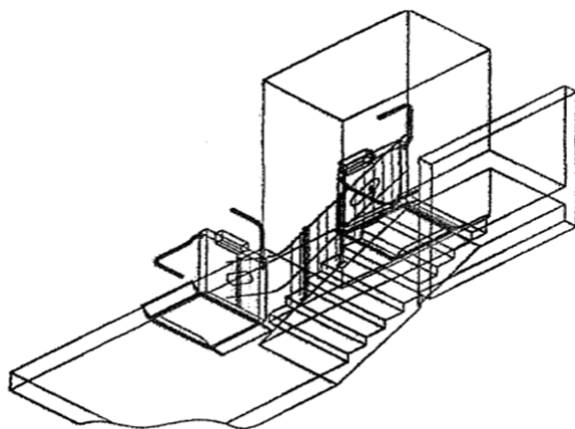


Рис. 6. Пример платформы наклонного подъема
Fig. 6. An inclined lift

лестничного марша. В настоящее время в использовании находится модифицированный вариант потолочных подъемных устройств — БК 021М (рис. 7), позволяющий перемещать инвалида по наклонной плоскости с поворотами [16]. Данное устройство подходит для узких лестничных клеток в многоэтаж-



Рис. 7. Подвесное подъемное устройство
Fig. 7. A ceiling lift

ных зданиях и частных домах, где нет возможности установить подъемное устройство с платформой.

К основным достоинствам применения наклонного подъемного устройства относятся:

- перемещение по лестничному маршруту, не покидая кресла-коляски;
- возможность установки даже на самых крутых и узких лестничных маршах;
- неограниченная протяженность направляющей магистрали;
- требуются минимальные усилия для закрепления кресла-коляски;
- подъемный модуль и магистраль занимают место на лестнице, поскольку устанавливаются под потолком;
- управление осуществляется с помощью кнопочного пульта;
- направляющая магистраль изготавливается индивидуально, поэтому учитывает все особенности лестничного марша.

В безлифтовых жилых домах массовых серий постройки 60–70-х гг. приспособление квартир для инвалидов-колясочников возможно осуществить или в процессе реконструкционной работы всей жилой секции, или только в пределах первого этажа. При приспособлении квартир первого этажа для проживания семей с инвалидом-колясочником возможно предусмотреть:

- самостоятельный доступный для МГН наружный вход, или для всего этажа секции, или для каждой квартиры в отдельности;
- увеличить габариты санитарного узла и кухни без нарушения нормативных ограничений взаимосвязи этих помещений по вертикали с помещениями квартир на вышележащихся этажах;
- осуществить перепланировку квартир с уменьшением количества комнат и увеличением нормативных показателей заселения в расчете на одного человека.

Изменение менталитета общества и повышение осведомленности о проблемах людей с ограниченными возможностями являются не менее важными мероприятиями. В настоящее время эта проблема как никогда актуальна, ведь особенно за последние полтора года количество людей так называемого социального меньшинства стремительно возросло ввиду проводимой СВО. И, к большому сожалению, в современном мире немалое количество людей имеет пренебрежительное отношение к группам с ограниченными возможностями здоровья [17]. А ведь когда-то в 1950-е гг. один чиновник сказал: «В СССР инвалидов нет!», когда встал вопрос их участия в международных спортивных играх. И несмотря на то, что в литературе и кинофильмах нередко появлялись герои-инвалиды, мало что было приспособлено для их жизни в обществе. На данный момент многое изменилось: Россией ратифицирована Конвенция ООН о правах инвалидов, уже несколько лет реализуется программа «Доступ-

ная среда», в г. Сочи провели Паралимпийские игры, однако в головах народа сохранился незблемый порядок, в котором инвалидность — это что-то нетипичное и непонятное, а потому угрожающее сложившейся реальности жизни. Именно до того момента пока такое мнение блуждает в умах людей, мы не сможем сделать новый шаг навстречу сильной нации. Становится очевидным, что необходимо большее информирование общества, проведение мероприятий, saniрующих препятствия коммуникации людей «двух сторон», максимизация оборудования мест общественного пользования для личностей с особенностями, и естественно, выполнение требований жилищного благоустройства [18, 19]. Какие усилия предпринимать и во имя чего объединяться — это вопросы моральных качеств каждого. Доверие, поддержка, взаимоуважение и гражданское участие поспособствуют сплочению общества, удерживая его от распада и социальной инвалидности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

О доступности особенно активно заговорили перед сочинской Олимпиадой. Тогда российские власти утвердили соответствующую госпрограмму на 2011–2015 гг. Потом ее несколько раз продлевали, и теперь она действует до 2025 г. За последние годы в Краснодаре было обустроено 1,5 тыс. объектов по программе «Доступная среда», которая нацелена на улучшение условий для маломобильных жителей. Интегрировать таких граждан в жизнь социума, обеспечить равный доступ к инфраструктуре, работе, учебе — главная задача. Несмотря на проделанную работу, остается много вопросов, требующих решения. Основопологающей целью программы является обеспечение людей с ограниченными возможностями равными условиями с остальными жителями [20], поэтому необходимо продолжать работу в этом направлении, ведь пока, как показывает краснодарский фотопроjekt «Этот город — я», она все еще далека от полноценной реализации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Замятина И.И., Оруджев Н.Я. Недееспособный человек в городе — кто он? // Социология города. 2014. № 1. С. 13–21. EDN RYQEZD.
2. Смирнов С.А. Город и Человек: очерки по городской антропологии // Город: Архитектура, история, управление. 2021. № 17. 280 с.
3. Петренко Я.С., Шнурникова Е.П. Доступная среда для проживания инвалидов-колясочников на примере города Краснодар // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2022. № 4. С. 215–219. EDN THNCLZ.
4. Зима А.Г. Проблема адаптации архитектурной среды под нужды маломобильных групп населения и понятие универсального дизайна // Оригинальные исследования. 2020. Т. 10. № 5. С. 268–275. EDN BWDRJB.
5. Gissen D. The architecture of disability: buildings, cities, and landscapes beyond access. University of Minnesota Press, 2022. 224 p.
6. Крюков А.Р., Смурова Н.Ю., Семикин П.П. Приспособление жилого фонда для проживания маломобильных групп населения // Жилищное строительство. 2012. № 11. С. 22–25. EDN PUVZSF.
7. Зиятдинова А.Р., Фахрутдинова И.А. Подходы к проектированию соседских пространств в контексте социологических теорий создания благоприятной городской среды // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2 (40). С. 60–69. EDN YQQLB.
8. Алексеева Е.С. Основные принципы проектирования доступного жилья для маломобильных групп населения // Современная наука и инновации. 2015. № 2 (10). С. 123–127. EDN UMMCHL.
9. Deitz S., Lobben A., Alferez A. Squeaky wheels: Missing data, disability, and power in the smart city // Big Data & Society. 2021. Vol. 8. Issue 2. DOI: 10.1177/20539517211047735
10. Halder S., Argyropoulos V. Inclusion, equity and access for individuals with disabilities. Palgrave Macmillan Singapore, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-5962-0
11. Wolniak R., Skotnicka-Zasadzien B. The perception of architectural barriers by disabled persons based on the case of the city hall of Katowice // International Multidisciplinary Scientific Conferences on Social Sciences and Arts SGEM 2014. 2014. Pp. 1025–1032. DOI: 10.5593/sgemsocial2014/B12/S2.131. EDN EBUXWW.
12. Senghor D.B., Diop O., Sombié I. Analysis of the impact of healthcare support initiatives for physically disabled people on their access to care in the city of Saint-Louis, Senegal // BMC Health Services Research. 2017. Vol. 17. Issue S2. DOI: 10.1186/s12913-017-2644-y
13. Mustafaev A.M. Analysis of the effectiveness of reconstruction of industrial buildings // Economics and Management of a National Economy. 2021. No. 11. Pp. 505–515.
14. Dobritsyna I. Spatialization as a special form of the spatial organization of the city, objectifying social existence // Proceedings of the 2019 International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2019). 2019. DOI: 10.2991/ahti-19.2019.89
15. Шолух Н.В., Васылев В.Н., Анисимов А.В. Обеспечение беспрепятственного доступа инвалидам к жилым и социально значимым объектам города в условиях значительных нормативных и пла-

нировочных ограничений // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. № 3 (131). С. 88–100. EDN YMZPSH.

16. *Абрамова С.Б.* Здоровьесберегающее городское пространство как маркер реализации права на город молодых инвалидов // XXII Уральские социологические чтения. Национальные проекты и социально-экономическое развитие Уральского региона : мат. Всерос. науч.-практ. конф. 2020. С. 222–226. EDN NTSPIC.

17. *Regenbrecht K.* Social protection and adaptation of disabled people in Germany. 2010. P. 30.

18. *Alaniz J.* Disability // Keywords for Comics Studies. 2021. Pp. 70–73.

19. *Date K., Allweil Y.* Towards a new image archive for the built environment // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2021. Vol. 49. Issue 2. Pp. 519–534. DOI: 10.1177/23998083211011474

20. *Рахманова М.С.* Анализ показателей оценки эффективности реализации муниципальной программы «Доступная среда» на 2014–2020 годы // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2021. Т. 10. № 4 (37). С. 221–223. DOI: 10.26140/anie-2021-1004-0052. EDN QZPVER.

Поступила в редакцию 21 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 января 2024 г.

Одобрена для публикации 1 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Елена Павловна Шнурникова** — старший преподаватель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; РИНЦ ID: 1052436, ORCID: 0000-0001-8061-0965; shnurnikova@mail.ru;

Софья Павловна Горзова — студентка; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; gorsp-sp04@mail.ru;

Валерия Витальевна Кононенко — студентка; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; kononenko.lera03@mail.ru.

Вклад авторов:

Шнурникова Е.П. — научное руководство, научное редактирование текста, участие в разработке учебных программ и их реализации.

Горзова С.П. — сбор материала, его обработка, написание исходного текста, участие в разработке учебных программ и их реализации, доработка текста, итоговые выводы.

Кононенко В.В. — сбор материала, его обработка, написание исходного текста, участие в разработке учебных программ и их реализации, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zamyatina I.I., Orudzhev N.Ya. Disabled people in a city — who are they? *Urban Sociology*. 2014; 1:13-21. EDN RYQEZD. (rus.).

2. Smirnov S.A. City and man: essays on urban anthropology. *City: Architecture, History, Management*. 2021; 17:280. (rus.).

3. Petrenko Ya.S., Shnurnikova E.P. Accessible living environment for wheelchair users on the example of the city of Krasnodar. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2022; 4:215-219. EDN THHCLZ. (rus.).

4. Zima A.G. The problem of adapting the architectural environment to the needs of people with limited mobility and the concept of universal design. *Original Research*. 2020; 10(5):268-275. EDN BWDRJB. (rus.).

5. Gissen D. *The Architecture of Disability: Buildings, Cities, and Landscapes beyond Access*. University of Minnesota Press, 2022; 224.

6. Kryukov A.R., Smurova N.Yu., Semikin P.P. Adaptation of housing stock for living of people with

limited mobility. *Housing Construction*. 2012; 11:22-25. EDN PUVZSF. (rus.).

7. Ziyatdinova A.R., Fahrutdinova I.A. Design approaches for neighboring spaces in a context of sociological theories of creating a friendly urban environment. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017; 2(40):60-69. EDN YQQQLB. (rus.).

8. Alekseeva E.S. Basic principles of affordable housing for people with limited mobility. *Modern Science and Innovations*. 2015; 2(10):123-127. EDN UMMCHL. (rus.).

9. Deitz S., Lobben A., Alferez A. Squeaky wheels: Missing data, disability, and power in the smart city. *Big Data & Society*. 2021; 8(2). DOI: 10.1177/2053951-7211047735

10. Halder S., Argyropoulos V. *Inclusion, Equity and Access for Individuals with Disabilities*. Palgrave Macmillan Singapore, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-5962-0

11. Wolniak R., Skotnicka-Zasadzien B. The perception of architectural barriers by disabled persons based on the case of the city hall of Katowice. *International Multidisciplinary Scientific Conferences on Social Sciences and Arts SGEM 2014*. 2014; 1025-1032. DOI: 10.5593/sgemsocial2014/B12/S2.131. EDN EBUXWW.
12. Senghor D.B., Diop O., Sombié I. Analysis of the impact of healthcare support initiatives for physically disabled people on their access to care in the city of Saint-Louis, Senegal. *BMC Health Services Research*. 2017; 17(S2). DOI: 10.1186/s12913-017-2644-y
13. Mustafaev A.M. Analysis of the effectiveness of reconstruction of industrial buildings. *Economics and Management of a National Economy*. 2021; 11:505-515.
14. Dobritsyna I. Spatialization as a special form of the spatial organization of the city, objectifying social existence. *Proceedings of the 2019 International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/ahti-19.2019.89
15. Sholukh N., Vasylev V., Anisimov A. Ensuring unlimited access to disabled people to residential and socially important objects of the city under the conditions of significant normative and planning limitations.

Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2018; 3(131):88-100. EDN YMZPSH. (rus.).

16. Abramova S.B. Health-saving urban space as a marker for the implementation of the right to the city of young disabled people. XXII Ural sociological readings. *National projects and socio-economic development of the Ural region : materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2020; 222-226. EDN NTSPIC. (rus.).

17. Regenbrecht K. *Social protection and adaptation of disabled people in Germany*. 2010; 30.

18. Alaniz J. Disability. *Keywords for Comics Studies*. 2021; 70-73.

19. Date K., Allweil Y. Towards a new image archive for the built environment. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2021; 49(2):519-534. DOI: 10.1177/23998083211011474

20. Rakhmanova M.S. Analysis of indicators for evaluating the effectiveness of the implementation of the municipal program "Accessible Environment" for 2014-2020. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2021; 10(4):221-223. DOI: 10.26140/anie-2021-1004-0052. EDN QZPVER. (rus.).

Received November 21, 2023.

Adopted in revised form on January 14, 2024.

Approved for publication on March 1, 2024.

B I O N O T E S : **Elena P. Shnurnikova** — senior lecturer of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named after A.V. Titova; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; ID RSCI: 1052436, ORCID: 0000-0001-8061-0965; shnurnikova@mail.ru;

Sofya P. Gorzova — student; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; gorsp-sp04@mail.ru;

Valeria V. Kononenko — student; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; kononenko.lera03@mail.ru.

Contribution of the authors:

Elena P. Shnurnikova — scientific leadership, scientific text editing, participation in the development of training programs and their implementation.

Sofya P. Gorzova — collection of material, its processing, writing the source text, participation in the development of educational programs and their implementation, revision of the text, final conclusions.

Valeria V. Kononenko — collection of material, its processing, writing the source text, participation in the development of educational programs and their implementation, revision of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

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

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 697.94

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1079-1090

Конструкции структурных покрытий в отечественной
практике проектирования и способы их монтажа

Сергей Сергеевич Потасьев

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При применении больших пролетов, необходимости повышенной жесткости каркаса пространственные системы экономнее классических решений с плоскими фермами. Наиболее экономна как по материалоемкости, так и по стоимости работ разреженная структура, позволяющая в короткие сроки ввести сооружение, отвечающее всем требованиям к промышленным и гражданским зданиям, в эксплуатацию.

Материалы и методы. Рассмотрены преимущества и недостатки структурных покрытий, определена основная область применения данного типа конструкций. На основе показателей материалоемкости и наиболее часто применяемых пролетов при возведении современных зданий и сооружений принято решение изучить типовые решения, разработанные отечественными научно-исследовательскими институтами. Описаны основные технические характеристики структурных блоков наиболее распространенных серий. Основным недостатком структурных конструкций в целом является технология монтажа, поэтому рассмотрены методы их монтажа. Выполнен анализ достоинств и недостатков каждого метода, определена их область использования.

Результаты. Выполнены обзор и анализ существующих структурных систем, в том числе серийных решений покрытий и методов их возведения. Определены критерии выбора наиболее оптимального метода монтажа блоков структурных покрытий. Выявлено, что серийные структурные покрытия типа «Кисловодск» и «Москва» не имеют точного алгоритма монтажа, и поэтому при строительстве зданий с такими покрытиями разрабатывается индивидуальный проект производства работ.

Выводы. Существующей в настоящее время технической базы недостаточно, чтобы на ее основе разработать отвечающий всем требованиям техники безопасности алгоритм возведения конструкций, а расчеты на монтажные нагрузки пока не произведены. На сегодняшний день имеются общие положения, которые разработаны для всех покрытий, но их применение нередко становится опасным из-за критических различий типов конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структурная система, блок покрытия разреженной структуры, методы монтажа, серия «Кисловодск», серия «Москва»

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Потасьев С.С. Конструкции структурных покрытий в отечественной практике проектирования и способы их монтажа // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1079–1090. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1079-1090

Автор, ответственный за переписку: Алсу Илсуровна Фаттахова, fattakhova.alsou@yandex.ru.

Space frame structures in domestic design practice
and their installation methods

Sergey S. Potasiev

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern construction demonstrates the wide use of various space frame types, because of their efficient from an engineering point of view, architecturally expressive, economical and durable. Large spans required increased frame rigidity; in such situations, space frames are more economical than classic flat trusses solutions. The most economical, both in material consumption terms and in the work cost are sparse structures. Such constructions meet all industrial and civil buildings requirements and have short building period. Not all safety requirements meeting building algorithm can be developed on currently existing technical base. More than that, domestic norms base does not include construction loads calculation methods. Critical differences in structures types determine building organization process but there are only general space frame building recommendations in domestic technical literature.

Materials and methods. The space frame advantages and disadvantages are considered, the main area of application of this type of structures is determined. On the basis of material consumption and the most commonly used spans in mod-

ern buildings and structures research results, it was decided to study standard solutions developed by domestic research institutes. The main technical characteristics of structural blocks of the most common series are described. The main disadvantage of space-grid structures in general is the installation technology, so the methods of their installation are considered. The advantages and disadvantages of each method are analyzed, their field of application is determined.

Results. The review and analysis of existing structural systems, including serial solutions of coverings and methods of their construction are performed. The most optimal method choosing criteria for structural blocks erection are determined. It was revealed that serial structural blocks such as "Kislovodsk" and "Moscow" do not have an exact installation algorithm. Therefore, an individual project is developed for the buildings with such coverings.

Conclusions. The currently existing technical base is not enough to develop erecting structures algorithm that meets all safety requirements, and calculations for construction loads have not yet been made on its basis. To date, there are general provisions that have been developed for all coverings, but their use often becomes extremely dangerous due to critical differences in the types of structures.

KEYWORDS: structural system, sparse structure block, erecting methods, "Kislovodsk" series, "Moscow" series

FOR CITATION: Potasiev S.S. Space frame structures in domestic design practice and their installation methods. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1079-1090. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1079-1090 (rus.).

Corresponding author: Alsou I. Fattakhova, fattakhova.alsou@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве широко применяются различные типы структурных систем из-за их эффективности с инженерной точки зрения, а также архитектурной выразительности. В гражданском строительстве — это перекрытия и покрытия торговых центров, спортзалов, кинотеатров и т.д.; в промышленном секторе, а также в сельском хозяйстве структурные системы выполняются в качестве несущих и ограждающих конструкций различного назначения [1].

При использовании больших пролетов требуется повышенная жесткость каркаса. При данной постановке задачи структурные системы экономнее классических решений с плоскими фермами. Наиболее экономна, как по материалоемкости, так и по стоимости работ, разреженная структура, позволяющая в короткие сроки ввести сооружение, отвечающее всем требованиям к промышленным и гражданским зданиям, в эксплуатацию [2].

В большинстве случаев большепролетные здания являются уникальными объектами и требуют научно-технического сопровождения на всех этапах проектирования и монтажа. А при возведении серийных пространственных покрытий, например «Кисловодск» и «Москва»^{1,2}, монтажные нагрузки не учтены, отсутствие рекомендаций по разработке проекта производства работ приводит к появлению неучтенных в серии нагрузок.

Действующей нормативной документацией для типовых и аналогичных типовым проектных решений не предусмотрены дополнительные расчеты на монтажные нагрузки, поэтому исследование этой области — актуальная задача.

¹ Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий из прокатных профилей с разреженной решеткой пролетом 18 и 24 м типа «Москва». Чертежи КМ // ЦНИИСК им. Кучеренко. 1987. С. 87.

² Пространственные решетчатые конструкции из труб типа «Кисловодск». Рабочие чертежи, серия 1.466-2 // Госстрой СССР. 1974. С. 8.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Узловое решение, позволяющее соединить несколько однотипных стержней, разработано на территории Германии в 30–40-х гг. прошлого века и давало возможность создавать покрытия со значительной жесткостью, обеспечивающие перекрытие больших пролетов. Структурные покрытия получили высокое распространение в строительстве промышленных и гражданских зданий из-за ряда преимуществ:

- пространственная работа системы: к положительным аспектам структур относится возможность перераспределения внутренних усилий и, как следствие, — способность воспринимать неравномерные, вибрационные и сейсмические нагрузки;
- возможность прогнозирования работы конструкции к внезапным деформациям: выход из строя большинства стержней не приводит к прогрессирующему разрушению, что позволяет устранять дефекты и повреждения;
- снижение общей строительной высоты: габариты структуры никогда не превышают габаритов аналогичного классического решения;
- возможность эффективного перекрытия значительных пролетов: исследования пространственных конструкций [3] показали, что при пролетах до 24 м рациональность применения все еще сопоставима с плоскими решениями, однако при больших пролетах использование пространственных решений зачастую становится единственно возможным и обоснованным выбором [4];
- свобода внутренней планировки: уменьшение количества колонн влечет за собой возможность разнообразной эксплуатации, экономит полезную площадь и позволяет переоборудовать технологические пути;
- архитектурная выразительность: данные решения удовлетворяют эстетическим требованиям, являются непривычными для рядового человека. Конструкции отвечают требованиям надежности и безопасности и в то же время создают любую форму;

- удобство размещений линий подвесного транспорта и оборудования: наличие большого количества решеток дает много пространства для размещения технологического оборудования, а жесткость конструкции позволяет производить закрепления в любом месте;

- возможность доставки в труднодоступные места и места без строительной инфраструктуры: вес структурных металлических перекрытий позволяет осуществлять доставку техникой меньшей грузоподъемности. При строительстве в условиях горной местности доставка возможна вертолетами [5], что дает возможность возводить здания в любых, даже самых сложных для строительства условиях;

- возможность разборки и повторной сборки: неоспоримое преимущество структур из металлоконструкций заключается в том, что они не только быстро собираются, но и могут быть быстро и без особых финансовых затрат разобраны. Применение этого принципа в строительстве дает возможность владельцу земли максимально выгодно ее использовать с учетом постоянного изменения конъюнктуры рынка;

- быстрые сроки возведения: сроки возведения зданий и сооружений из металлических конструкций в полтора-два раза быстрее здания, в котором применяются классические решения [5]. При строительстве глобальных сооружений экономия времени может стать значительным, а зачастую и принципиально важным для заказчика фактором;

- экономические показатели: финансовые затраты на возведение здания из металлоконструкций, особенно большепролетного, ощутимо меньше, чем на строительство аналогичного здания с использованием традиционных материалов. Существенная экономия при строительстве зданий на базе металлоконструкций достигается и за счет снижения затрат нулевого цикла примерно на 50 %³;

- возможность унификации элементов: унификация узлов и элементов конструкции позволяет наладить массовое механизированное производство с последующим удешевлением всей системы, повышением качества изделия, производительности и скорости производства. Хранение готовых изделий требует меньших складских площадей, чем классические металлические и железобетонные решения. Это обусловлено малыми размерами отдельных позиций и возможностью их расфасовки по складам;

- широкий диапазон назначения зданий: свобода внутренней планировки, особенности материалов конструкций и большая способность к дооснащению, позволяет эксплуатировать здание при различных климатических условиях, а также

использовать практически во всех сферах промышленного и гражданского сектора.

Изначально на практике структурные конструкции применялись только в качестве уникальных конструкций и не могли конкурировать с классическими решениями по экономическим показателям. Недостатками разработанной системы «Меро» оказались высокие затраты на проектирование, низкое качество отдельных элементов и трудоемкий процесс монтажа [4].

Оптимизацией узловых решений структур начал заниматься Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко) в 80-х гг. [1]. Целью ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко было не только усовершенствовать существующую систему зарубежных ученых, но и разработать типовые серии, позволяющие значительно сократить сроки проектирования и стоимость производства структурных конструкций.

Так, были разработаны серии пространственных конструкций, состоящие из прокатных профилей, «ЦНИИСК» и труб системы «МАРХИ» и «Кисловодск», которые отвечали всем требованиям строительных норм, имели высокую степень разработанности и хороший потенциал для дальнейшей модернизации³.

Структурные покрытия типа «Кисловодск»² (рис. 1), изготовленные по типовой серии 1.466-2, разработаны в 1973 г., состоят из труб диаметром от 60 × 3 до 127 × 7. Пространственные решетчатые конструкции предназначены как для однопролетных, так и многопролетных одноэтажных зданий. Примечательно, что серия² не предусматривает перепады высот, зенитные фонари. Структуры предназначены для перекрытия секции здания размерами в плане 30 × 30 и 36 × 36 м с внутриконтурным опиранием на четыре колонны, которые расположены для секции 30 × 30 м с шагом 18 × 18 м и для секции 36 × 36 м с шагом 24 × 24 м [6–8]. Структурные плиты типа «Кисловодск» имеют сетку поясов с ячейкой 3 × 3 м и высотой по осям поясов, равной 2,12 м.

Шаг колонн принят по размерам структурного блока и составляет 18 или 24 м при высоте здания 4,8; 6 и 7,2 м. Серия² допускает установку подвесных кранов грузоподъемностью до 2 т.

Расход стали на покрытие секций 30 × 30 м в плане составляет 35,36–37,14 кг/м² [6].

Узел системы «Кисловодск» состоит из литого сферического, полусферического, либо многогранного элемента-коннектора с высверленными в нем отверстиями для болтов по числу примыкающих стержней (рис. 2). Болт пропускают в отверстие плоского цилиндрического вкладыша, запрессованного в торец трубчатого стержня и приваренного к нему. Между торцами коннектора и вкладыша размещают поводковую втулку шестигранного сечения с отверстием под болт, снабженную штифтовым

³ Рекомендации по проектированию структурных конструкций. М. : Стройиздат, 1984. 301 с.

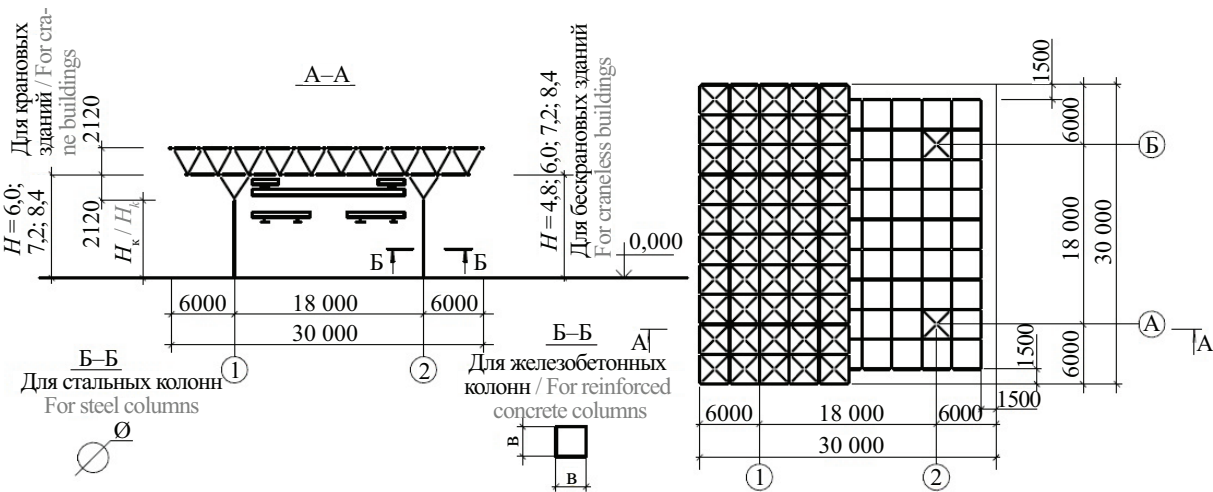


Рис. 1. Покрытие типа «Кисловодск» [6]
Fig. 1. “Kislovodsk” type covering [6]

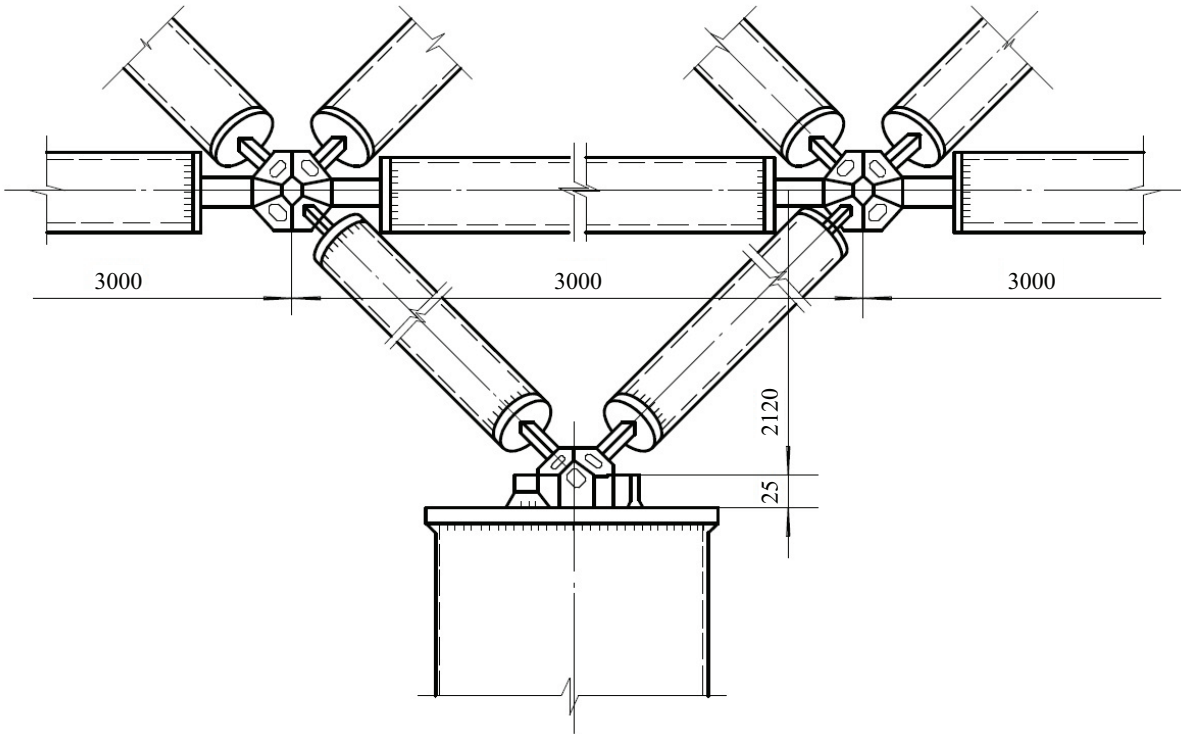


Рис. 2. Схема установки системы «Кисловодск» на колонну [8]
Fig. 2. The “Kislovodsk” system installation scheme on the column [8]

фиксатором. Болт с помощью втулки завинчивают в коннектор до плотного касания между втулкой и торцевыми поверхностями, что обеспечивает передачу сжимающих усилий через втулку и площадки касания, а растягивающих — через болт. Трудоемкость монтажа сборно-разборной системы составляет 1–1,5 чел.ч/м² перекрываемой площади [7].
Собирают каждый блок от центра к краям путем последовательного присоединения стержней

нижнего пояса, элементов раскосной решетки с узловыми деталями пояса и панелей верхнего пояса.
Структурные покрытия типа «Москва» (рис. 3), изготовленные по типовой серии 1.460-6¹, представляют собой блоки из стержней двутаврового сечения и равнополочных уголков. Блоки предназначены для применения в одно- и многопролетных отапливаемых зданиях с сеткой колонн 12 × 18 м и 12 × 24 м и высотой до низа несущих конструкций

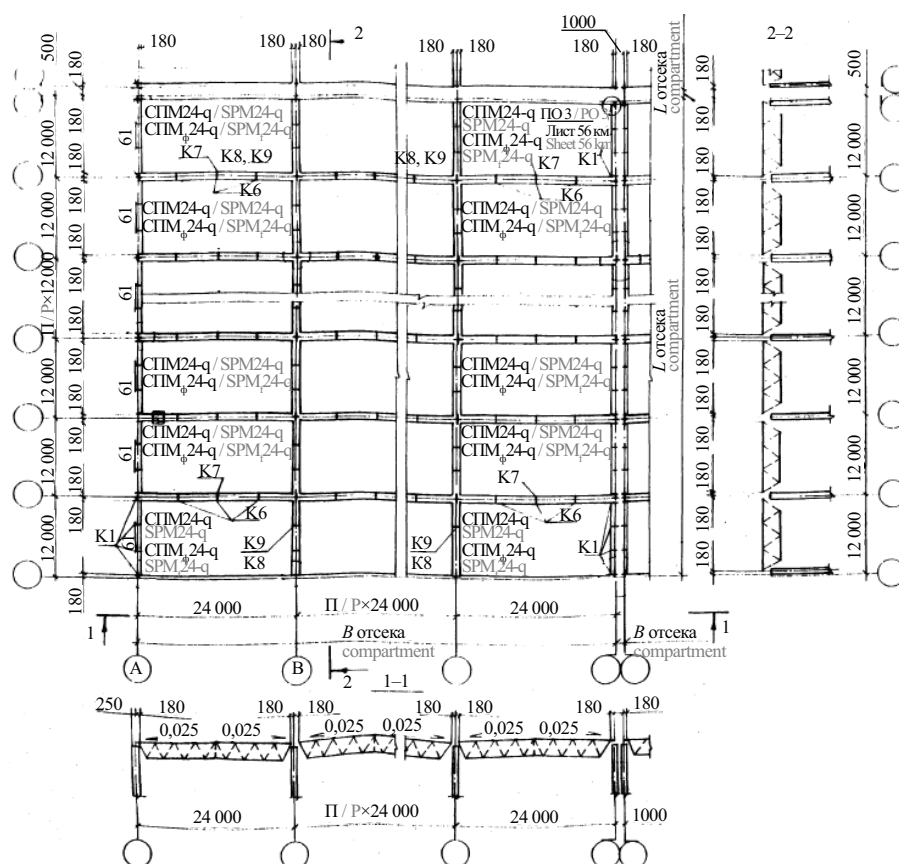


Рис. 3. Структурный блок покрытия типа «Москва»¹

Fig. 3. Structural block type “Moscow”¹

покрытия 4,8–10,8 м, для I–VI снеговых районов и I–VII ветровых.

Предусмотрена установка подвешного крана грузоподъемностью до 3,2 т, зенитных фонарей и вентиляторов.

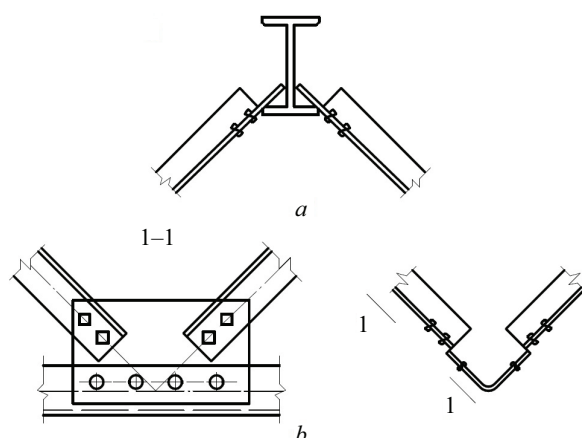


Рис. 4. Узлы пространственной стержневой структуры «Москва»: а — узел верхнего пояса; б — узел нижнего пояса [9]

Fig. 4. Nodes of the spatial rod structure “Moscow”: а — the upper belt node; б — the lower belt node [9]

Структурный блок покрытия размерами в плане 12 × 18 и 12 × 24 м состоит из наклонных ферм, выполненных из равнополочных уголков и двутавров, в двух направлениях и предусматривает рулонную кровлю с уклоном 1,5 %. Совместная работа пространственных ферм блока обеспечивается дополнительными раскосами и поперечными элементами по поясам. Панели верхнего пояса двутаврового сечения установлены с шагом 3 м и выполняют функцию прогонов. Закрепление профилированного настила в каждую гофру предполагает возможность работы блока и на горизонтальные нагрузки.

Расход стали на блок типа «Москва» зависит от расчетной нагрузки и пролета, значения варьируются от 22 до 35 кг/м² [6].

Структурные покрытия «Москва» имеют только болтовые монтажные соединения (рис. 4). Изготовленные на заводе плоские фермы собирают на стендах в зоне монтажа, а при конвейерно-блочном монтаже — на сборочном конвейере.

Серийные структурные конструкции применялись на территории Советского Союза и продолжают использоваться в бывших союзных республиках и России. Например, на территории Республики Башкортостан эксплуатируется порядка пятисот объектов с применением структурных конструкций, из которых около трехсот — конструкции типа

«Кисловодск», а остальные — разновидности систем «МАРХИ» («Москва»). Активно применяет такие решения компания АНК «Башнефть». Эксплуатируя здания с применением структурных покрытий, заказчики особенно отмечают универсальность структур и возможность производить многократную сборку-разборку [4].

На территории Татарстана в г. Буинске один из корпусов спиртзавода перекрыт структурными покрытиями типа «Кисловодск». Другой объект, перекрытый по этой же серии структур, расположен в г. Казани — автомобильный салон Мерседес-Бенц [10].

Проектирование данных конструкций регламентируется СП 494.1325800.2020 [11], разработанным авторским коллективом «НИЦ “Строительство”» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, в частности П.Г. Еремеевым, И.И. Ведяковым и Д.Б. Киселёвым. Данный нормативный документ содержит информацию об общих принципах проектирования и возведения, основные положения по расчету и примеры применения различных большепролетных конструкций.

Недостатком пространственных конструкций считается сложность конструкции и большая трудоемкость при монтаже. Эти недостатки отчасти нивелированы разработкой отечественными проектными институтами серийных альбомов для изготовления на заводах, оборудованных соответствующими технологическими линиями.

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

Монтаж структурных конструкций возможен различными способами. Выбор технологии возведения обусловлен видом покрытия, условиями строительства, используемым оборудованием, системой опор и опорных узловых соединений, стесненностью условий, площадью перекрываемой территории [12].

Монтаж возможен следующими способами:

- поэлементная сборка с использованием кондуктора;
- укрупнительная сборка блока полужаботской готовности;
- конвейерная сборка и монтаж блока полной заводской готовности.

При равных условиях строительства определяющим параметром выбора способа монтажа является габарит конструкции: чем больше перекрываемая площадь здания, тем более сложному и индустриальному способу отдается предпочтение. Согласно данным опыта разработки проектов производства работ, обобщенным в работе [13], поэлементный монтаж выгоден при перекрытии

до 10 000 м², при больших площадях предпочтение отдается укрупнительному монтажу. При организации покрытий площадью более 30 000 м² предусматривается конвейерный метод монтажа.

Поэлементный монтаж

Поэлементный монтаж (рис. 5) служит частью всех вышеперечисленных методов, но эффективен при перекрытии небольших площадей. Суть метода заключается в сборке отдельных отправочных элементов в единый блок на проектной отметке. Высокий передвижной стенд (кондуктор) устанавливают так, что настил находится на 0,3–0,5 м ниже нижнего пояса структурного блока. Кран малой грузоподъемности осуществляет подачу элементов структуры, кровельного пирога и инженерных коммуникаций. Работу выполняют 10–12 человек, и за смену выполняется примерно 0,5 блока [14].

Сборку отправочных элементов структурной плиты выполняют ячейками от центра к краям блока. Размер ячейки определяется сеткой элементов структуры.

При проведении поэлементного монтажа в качестве подготовительного этапа сборка производится не на проектной отметке, а на площадке укрупнительной сборки.

Поэлементный монтаж структуры навесным методом на проектных отметках здания представлен на рис. 6. Передвижные леса позволяют собирать структуру сразу на уровне проектной отметки.

Преимущества метода поэлементной сборки:

- невысокие затраты на монтаж;
- применение кранов малой мощности;
- недостатки метода поэлементной сборки;
- необходимость изготовления передвижных лесов;
- необходимость изготовления автодорог в каждом пролете;
- невысокая производительность при монтаже;
- применение только для объектов с площадью покрытия до 10 000 м².

Укрупнительная сборка блока полужаботской готовности

Укрупненный монтаж структурных плит покрытия эффективен при возведении многопролетных зданий, где удобнее устанавливать на проектную отметку уже собранные блоки структурных покрытий. Непрерывная конвейерная сборка и монтаж укрупненных блоков структуры осуществляется за счет одновременной работы нескольких кондукторов. На одном из них производится сборка структуры, на втором — подготовка готового блока к монтажу, т.е. оснащение его монтажными приспособлениями к последующему подъему.

Сборочные кондукторы располагают за пределами монтажного поля, в зоне действия стрелового крана, обслуживающего кондукторы и поднимающего блоки на проектные оси здания (рис. 7).

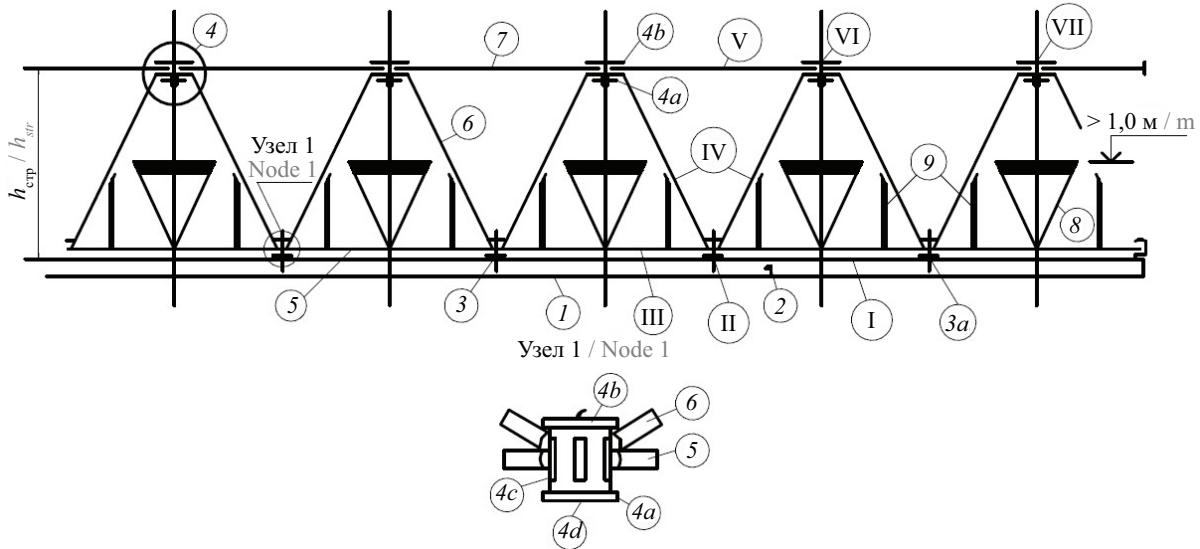


Рис. 5. Принципиальная схема поэлементной сборки: 1 — настил кондуктора; 2 — рама кондуктора; 3 — патрубок для крепления узла нижнего пояса; 3а — крышка нижней коробки; 4 — фиксация узлов верхнего пояса; 4а, 4б — элементы фиксации узла; 4с — узел структуры; 4д — болтовое соединение; 5 — стержень нижнего пояса; 6 — стержни раскосной решетки; 7 — стержень верхнего пояса; 8 — монтажные подмости; 9 — стойки выверки раскосной решетки; I, II, III...VI, VII — последовательность сборки отправочных марок; $h_{стр}$ — высота структурной плиты [14]

Fig. 5. The element-by-element assembly's schematic diagram: 1 — conductor flooring; 2 — conductor frame; 3 — “pipe” for fastening the lower chord assembly; 3а — the lower box cover; 4 — the upper belt nodes fixation; 4а, 4б — node fixation elements; 4с — structure node; 4д — bolted connection; 5 — the lower belt rod; 6 — diagonal lattice rods; 7 — the upper chord rod; 8 — installation scaffolding; 9 — the diagonal grid alignment posts; I, II, III...VI, VII — shipping stamps assembly sequence; h_{str} — structural slab's height [14]

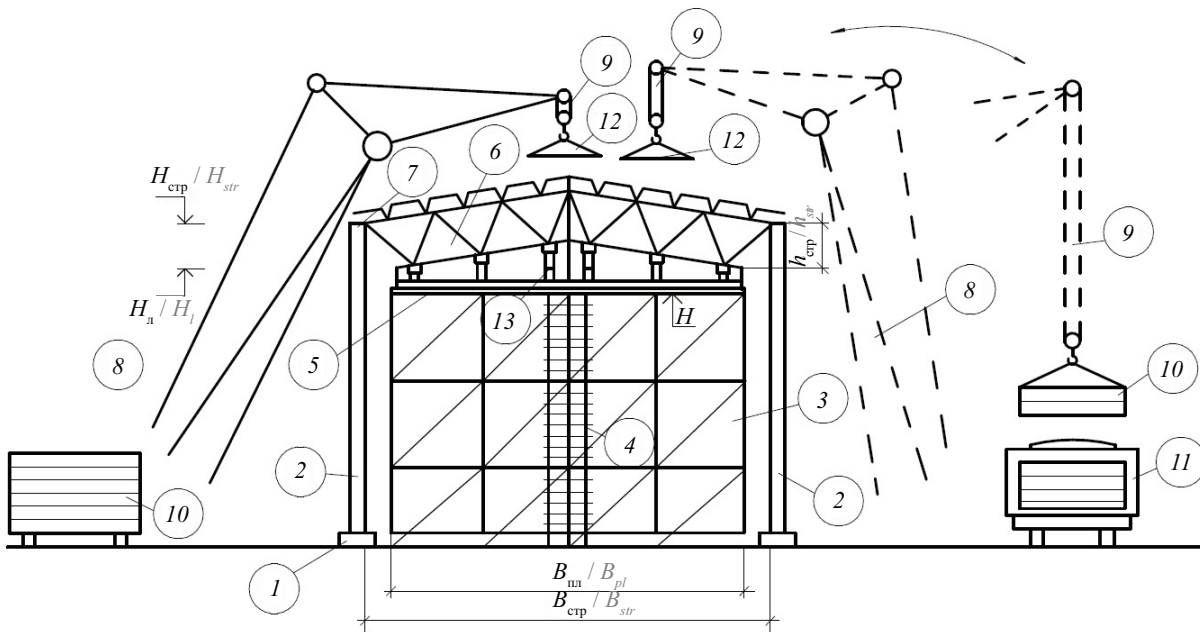


Рис. 6. Принципиальная схема «навесного» монтажа поэлементным методом: 1 — фундамент; 2 — колонны; 3 — передвижные леса; 4 — стремянка лесов; 5 — настил лесов и кондуктор; 6 — структура; 7 — опорный узел; 8 — самоходный кран; 9 — полиспаст; 10 — пакет с отправочными марками; 11 — доставка отправочных марок; 12 — складирование комплектов отправочных марок; 13 — гидродомкраты; H_n — высота настила лесов; $H_{стр}$ — отметка верхнего пояса плиты; $h_{стр}$ — высота плиты; $B_{пл}$ — ширина передвижных лесов; $B_{стр}$ — пролет структурной плиты, м [14]

Fig. 6. Schematic diagram of “mounted” installation using the element-by-element method: 1 — foundation; 2 — columns; 3 — mobile scaffolding; 4 — scaffolding ladder; 5 — scaffolding decking and conductor; 6 — structure; 7 — reference node; 8 — mobile crane; 9 — chain hoist; 10 — a package with structure shipping marks; 11 — shipping stamps delivery; 12 — shipping stamps sets storage; 13 — hydraulic jacks; H_n — scaffolding flooring height; H_{str} — slab's upper belt mark; h_{str} — plate height; B_{pl} — mobile scaffolding width; B_{str} — structural slab span, m [14]

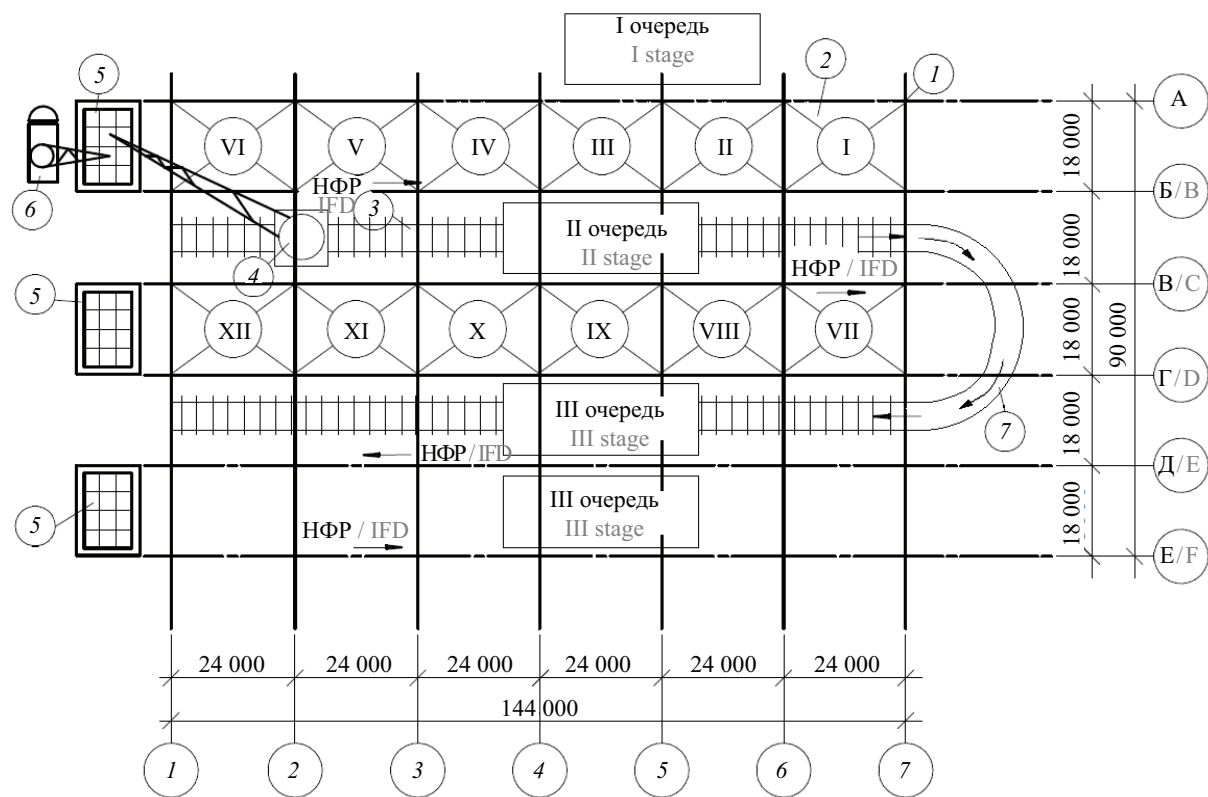


Рис. 7. Первая очередь монтажа: 1 — колонны; 2 — монтируемые секции; 3 — путь движения стрелового крана; 4 — стреловой кран; 5 — сборочные кондукторы; 6 — автокран для сборки структуры на стенде; 7 — путь перехода крана в следующий пролет; НФР — направление фронта работ при монтаже блоков [15]

Fig. 7. The first stage of installation: 1 — columns; 2 — mounted sections; 3 — jib crane's runway; 4 — jib crane; 5 — assembly conductors; 6 — truck crane for assembling the structure at the stand; 7 — path for a crane to move to the next span; IFD — the work during the blocks installation front direction [15]

Предпочтение отдается стреловому крану, подкрановые пути которого устанавливаются через пролет. При этом длины стрелы крана достаточно для обслуживания сразу нескольких пролетов. Автокран применяется для подачи отправочных элементов на кондукторы поэлементной сборки.

Стреловой кран (рис. 7) монтирует I очередь при расположении крановых путей в осях Б–В. Башенный кран 4 поднимает блок со сборочного кондуктора 5 и переносит его на уровень проектной отметки. После установки блоков в осях А–Б осуществляется переброска крана в пролет Г–Д для монтажа блоков покрытия в осях В–Г. Монтаж блоков через пролет позволяет обеспечить достаточный радиус для поворота крана. По окончании монтажа блоков в нечетных пролетах стреловой кран монтирует блоки в четных пролетах, при этом расположение сборочных кондукторов 5 не меняют.

Достоинства метода укрупнительной сборки:

- отсутствие рельсовых путей для подачи блоков;
- применение серийных башенных кранов;
- недостатки метода укрупнительной сборки;
- устройство кровли параллельно с монтажом на проектной отметке;
- дополнительные затраты на устройство стенов.

Конвейерный метод

Данный метод разработан для возведения серийных одноэтажных зданий. Предусматривается организация «конвейера» по сборке структурных блоков полной заводской готовности. Размеры блоков позволяют транспортировать их на место возведения здания, а не организовывать площадку укрупнительной или поэлементной сборки по месту строительства. Возведение здания заключается в установке колонн в проектное положение с последующим закреплением блока покрытия на проектной отметке, далее участок возводимого здания передается под монтаж оборудования и ограждающих конструкций.

Применение однотипных блоков структурных покрытий ограниченного размера дает возможность организовать поэлементную сборку в заводских условиях, следовательно, сократить сроки монтажных работ каркаса на площадке более чем в 2 раза.

Принципиальная схема организации строительного конвейера представлена на рис. 8. На данном рисунке приводится организация заводского изготовления непосредственно на прилегающей к строительной площадке территории.

На рис. 9 приведена схема организации поста сборки структурного блока. В отличие от сборки структурных плит укрупненным методом работы

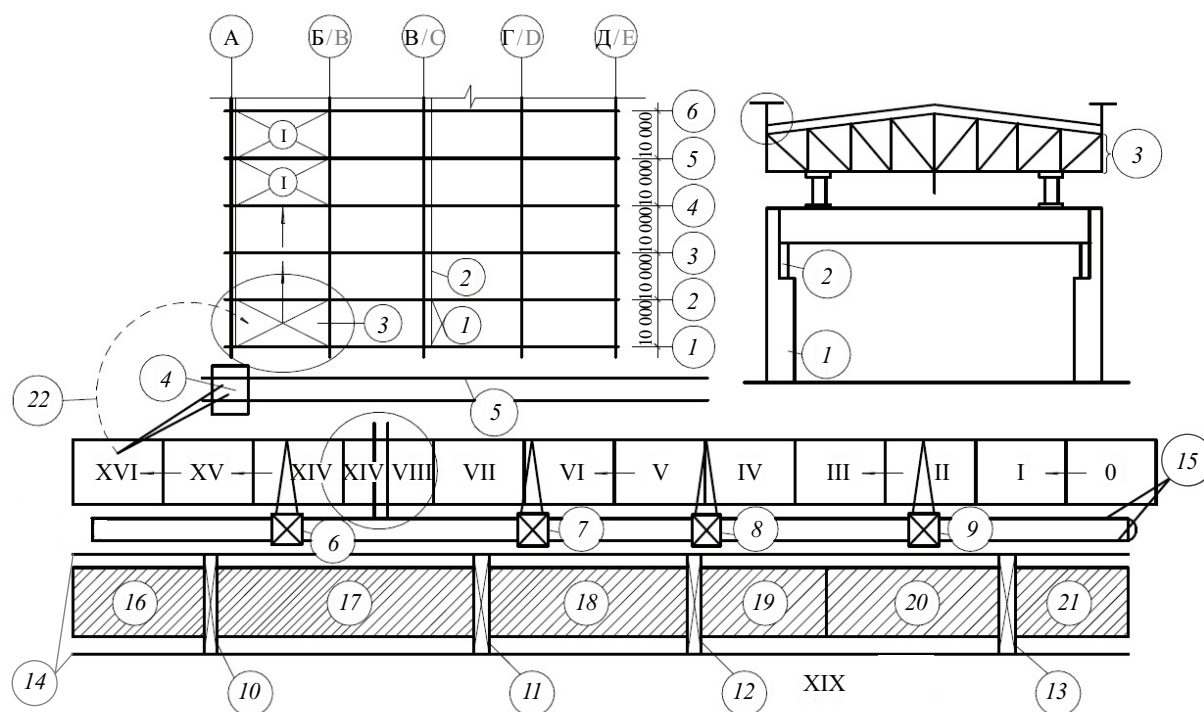


Рис. 8. Принципиальная схема организации конвейера: 1 — колонны; 2 — подкрановые балки; 3 — «установщик» с монтируемым блоком; 4 — башенный кран для подъема блоков; 5 — подкрановые пути; 6–9 — башенные краны конвейера; 10–13 — козловые краны, обслуживающие конвейер поэлементного монтажа блоков; 14, 15 — подкрановые пути башенных и козловых кранов; 16–21 — площадки складирования элементов конструкций конвейера; 22 — подача готового блока на «установщик»; 0, I, II ... XVI — номера постов конвейера поэлементной сборки [16]

Fig. 8. The conveyor organization schematic diagram: 1 — columns; 2 — crane beams; 3 — “installer” with a mounted block; 4 — tower crane for lifting blocks; 5 — crane tracks; 6–9 — conveyor tower cranes; 10–13 — gantry cranes serving the conveyor for blocks element-by-element assembly; 14, 15 — tower and gantry cranes crane tracks; 16–21 — storage areas for conveyor structural elements; 22 — the finished block’s submission to the “installer”; 0, I, II ... XVI — the element-by-element assembly conveyor’s station numbers [16]

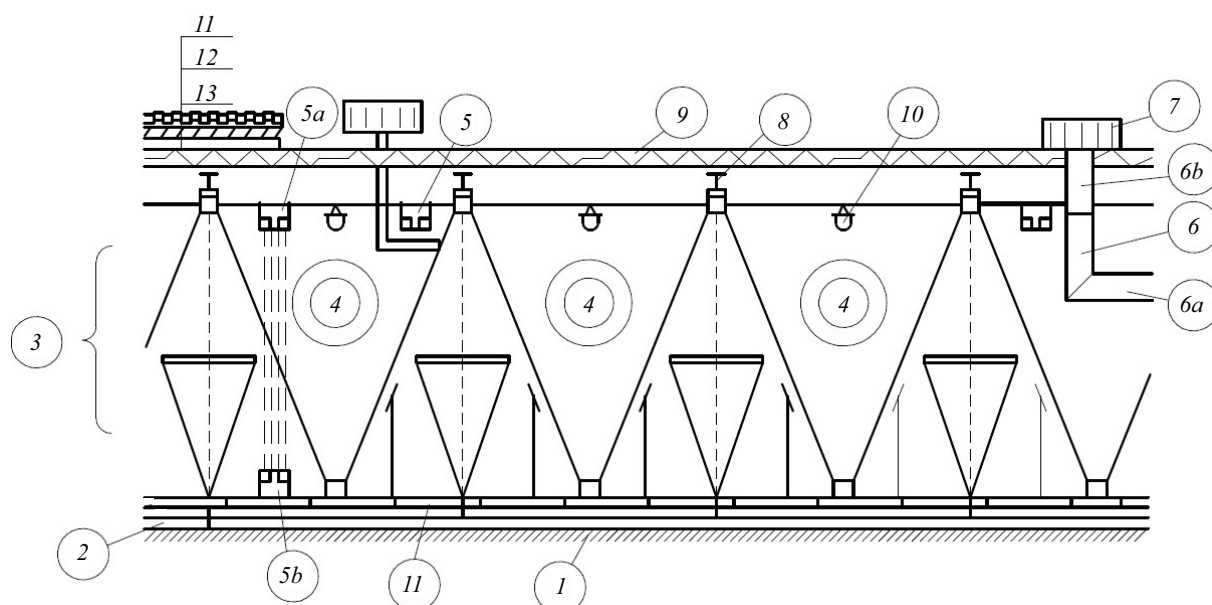


Рис. 9. Принципиальная схема организации поста подготовки структурного блока: 1 — основание; 2 — кондуктор; 3 — собираемая структура; 4 — инженерные коммуникации; 5 (5a, 5b) — устройство водоотвода с кровли; 6 (6a, 6b), 7 — устройство вентиляции; 8 — прогоны; 9 — кровельный пирог; 10 — система электроснабжения и освещения; 11 — стержень нижнего пояса структуры [17]

Fig. 9. Principle scheme of the structural block preparation post organization: 1 — base; 2 — conductor; 3 — assembled structure; 4 — engineering communications; 5 (5a, 5b) — roof drainage device; 6 (6a, 6b), 7 — ventilation device; 8 — purlins; 9 — roofing pie; 10 — power supply and lighting system; 11 — the structure’s lower chord’s rod [17]

при сборе блока конвейерным методом предусмотрена, в том числе, установка подвешенного оборудования и инженерных коммуникаций, а также установка кровельного пирога за исключением верхнего слоя рулонной кровли в местах стыка блоков. Каждая операция выполняется на отдельном посту. Применение козловых кранов позволяет перемещать блоки от поста к посту.

Достоинства метода монтажа конвейером:

- высокая интенсивность монтажа;
- возможность осваивать значительные площади покрытия.

Недостатки метода монтажа конвейером:

- высокие затраты на устройство конвейерной линии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе рассмотренного материала сделаны следующие выводы.

Структурные конструкции покрытия получили широкое распространение для строительства зданий промышленного и гражданского назначения, активно применяются в зданиях, где нежелательно использовать частую сетку колонн.

Эффективность использования структурных покрытий значительно растет с увеличением перекрываемой площади. Если при пролетах до 24 м структурные конструкции все еще сопоставимы с плоскими конструкциями, то при больших пролетах технико-экономические показатели структур

растут. При пролетах свыше 60 м использование структурных покрытий часто является единственным эффективным выбором.

Среди многообразия структур в нашей стране повсеместное распространение получили унифицированные проекты: «Москва», «Кисловодск» и другие ввиду универсальности и многофункциональности конструкции.

Монтаж структурных плит покрытия осуществляется тремя методами: поэлементной сборкой, крупноблочным монтажом и конвейерной сборкой блоков покрытия. Окончательный выбор способа монтажа обусловлен перекрываемой площадью, условиями строительства, производственными мощностями, экономической обоснованностью.

В результате анализа технической литературы выявлено, что покрытия типа «Кисловодск» и «Москва» не имеют точного алгоритма монтажа, и поэтому при строительстве зданий с такими покрытиями разрабатывается индивидуальный проект производства работ.

Существующей в настоящее время технической базы недостаточно, чтобы на ее основе разработать отвечающий всем требованиям техники безопасности алгоритм возведения конструкций, а расчеты на монтажные нагрузки не произведены до сих пор. На сегодняшний день существуют общие положения, которые разработаны для всех покрытий, но их применение нередко становится крайне опасным из-за критических различий типов конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мельников Р.В. Технологические особенности пространственно-стержневых покрытий зданий // Инновационная наука. 2022. № 11–2. С. 29–31. EDN PRACFW.

2. Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н., Беленя Е.И., Балдин В.А., Лессиг Е.Н. Металлические конструкции. Специальный курс. М. : Стройиздат, 1961. С. 365.

3. Туснин А.Р., Рыбаков В.А., Назмеева Т.В., Салахутдинов М.А., Хайдаров Л.И., Исаев А.В. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 2. Металлические конструкции. Специальный курс : учебник для вузов. М. : Изд-во «Перо», 2020. 436 с. EDN RCGYZK.

4. Оржеховский А.Н., Муцанов А.В., Штурмина А.А., Штурмина В.А. Оптимизация конструкции структурного покрытия из труб на прямоугольном плане // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 3 (143). С. 49–53. EDN JRDHRV.

5. Трофимов В.И., Каминский А.М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2002. 571 с.

6. Семенов В.С. Эффективные металлические конструкции покрытий зданий в практике проектирования и строительства Кыргызстана. Бишкек : Кыргызский гос. ун-т строительства, транспорта и архитектуры, 2004. 180 с. EDN OWOXBK.

7. Мищенко А.В. Оптимизация структурно неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 6 (750). С. 20–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32. EDN YRLKDI.

8. Филипович С.В., Латыпов В.М., Филипович С.С. Статистика некоторых результатов обследования зданий с пространственными решетчатыми покрытиями из труб типа «Кисловодск». Анализ напряженно-деформированного состояния с учетом дефектов монтажа // Предотвращение аварий зданий и сооружений. 2010. С. 3–8.

9. Шилов А.В., Погорелов В.А., Теняков А.А. Применение структурных покрытий в зданиях каркасного типа // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 181. EDN JFRBHG.

10. Агафонкин В.С., Моисеев М.В., Исаева Л.А., Дымолазов М.А. Усиление структурных конструкций с узловым решением «Меро-МАрхИ» // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 2 (16). С. 76–80. EDN NWAIBU.

11. Беленя Е.И., Стрелецкий Н.Н., Ведеников Г.С. и др. Металлические конструкции: спец. курс : учебник. 2-е изд., перераб и доп. М. : Стройиздат, 1982. 472 с.

12. Мельников Р.В. Перекрестно-стержневые (структурные) конструкции покрытий, методы их возведения и варианты опирания // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвящ. 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова : сб. докл. 2023. С. 188–194. EDN FWULAG.

13. Федорцев И.В., Султанова Е.А. Технология возведения конструкций покрытия большепролет-

ных зданий : учебное пособие. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2008. С. 20–22.

14. Жданова Т.О. Технологические методы возведения структурных металлических конструкций // Студенческий вестник. 2021. № 10–3 (155). С. 33–36. EDN OYWHOR.

15. Абрамян С.Г., Мошников М.А., Иванов С.Ю. Модификация технологии монтажа укрупненных блоков структурных покрытий // Инженерный Вестник Дона. 2020. № 5 (65). С. 45. EDN PFAECI.

16. Олесов И.П. Совершенствование конвейерной сборки блоков покрытия и крупноблочного монтажа производственных зданий. М. : ЦБНТИ, 1975. № 4. С. 99–103.

17. Клевцов К.В., Кочетов Б.В., Межеричев В.В., Огай К.А. Строительно-монтажный конвейер. М. : Стройиздат, 1980. С. 34.

Поступила в редакцию 24 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 24 января 2024 г.

Одобрена для публикации 31 января 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Сергей Сергеевич Потасьев — магистр; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; sergeysergeevichmg@gmail.com.

REFERENCES

1. Melnikov R.V. Technological features of space-rod coatings of buildings. *Innovation Science*. 2022; 11-2:29-31. EDN PRACFW. (rus.).

2. Streletsky N.S., Geniev A.N., Belenya E.I., Baldin V.A., Lessig E.N. *Metal constructions. Special course*. Moscow, Stroyizdat, 1961; 365. (rus.).

3. Tusnin A.R., Rybakov V.A., Nazmeeva T.V., Salakhutdinov M.A., Khaidarov L.I., Isaev A.V. et al. *Design of metal structures. Part 2. Metal structures. Special course: textbook for universities*. Moscow, Pero Publishing House, 2020; 436. EDN RCGYZK. (rus.).

4. Orzhekhovskiy A., Mushchanov A., Shturmina A., Shturmina V. Optimization of the design of the structural coating of pipes on a rectangular plan. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020; 3(143):49-53. EDN JRDHRV. (rus.).

5. Trofimov V.I., Kaminsky A.M. *Light metal structures of buildings and structures : textbook*. Moscow, Publishing House ASV, 2002; 571. (rus.).

6. Semenov V.S. *Efficient spatial metal structures of building roofs in the design and construction practice of Kyrgyzstan*. Bishkek, KSUCTA, 2004; 180. EDN OWOXBK. (rus.).

7. Mishchenko A.V. Optimization of structural-inhomogeneous rod structures based on energy criterion. *News of Higher Educational Institutions. Construction*.

2021; 6(750):20-32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32. EDN YRLKDI. (rus.).

8. Filipovich S.V., Latypov V.M., Filipovich S.S. Statistics of some results of the survey of buildings with spatial lattice coatings from pipes of the “Kislovodsk” type. Analysis of the stress-strain state, taking into account installation defects. *Prevention of Accidents in Buildings and Structures*. 2010; 3-8. (rus.).

9. Pobegalov O.A., Dilanian A.A., Vlasenko V.I. Application of structural coatings in frame-type buildings. *Engineering journal of Don*. 2018; 4(51):181. EDN JFRBHG. (rus.).

10. Strengthening structural constructions with “Mero-MArchI” nodal solution. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2011; 2(16):76-80. EDN NWAIBU. (rus.).

11. Belenya E.I., Streletsky N.N., Vedenikov G.S. et al. *Metal structures: special course: textbook*. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow, Stroyizdat, 1982; 472. (rus.).

12. Melnikov R.V. Cross-rod (structural) structures of coverings, methods of their construction and support options. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU. V.G. Shukhov, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov*. 2023; 188-194. EDN FWULAG. (rus.).

13. Fedortsev I.V., Sultanov E.A. *Technology of erection of roof structures for large-span buildings*. Ufa, UGNTU Publishing House, 2008; 20-22. (rus.).

14. Zhdanova T.O. Technological methods for the construction of structural metal structures. *Student Bulletin*. 2021; 10-3(155):33-36. EDN OYWHOR. (rus.).

15. Abramyan S.G., Moshnikov M.A., Ivanov S.Y. Modification of installation technology for prefabricated

space frame units. *Engineering Journal of Don*. 2020; 5(65):45. EDN PFAECI. (rus.).

16. Olesov I.P. *Improving the conveyor assembly of coating blocks and large-block assembly of industrial buildings*. Moscow, TsBNTI, 1975; 4:99-103. (rus.).

17. Klevtsov K.V., Kochetov B.V., Mezherichev V.V., Ogai K.A. *Construction and assembly conveyor*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980; 34. (rus.).

Received November 24, 2023.

Adopted in revised form on January 24, 2023.

Approved for publication on January 31, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey S. Potasiev** — master; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; sergeysergeevichmg@gmail.com.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.071:624.044

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1091-1103

Усовершенствованная методика расчета гибких вант

Андрей Владимирович Чесноков, Виталий Витальевич Михайлов

Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ); г. Липецк, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Вантовые системы принадлежат к числу перспективных направлений развития конструкций покрытия. Анализ вантовых конструкций в специализированных расчетных комплексах, не нацеленных на поиск оптимальных параметров и вариантную проработку, приводит к неэффективным проектным решениям. Совершенствование методов расчета и проектирования вантовых систем — важная задача. Предлагается методика расчета гибких вант, включающая однотипные операции суммирования коэффициентов и их произведений, что позволяет реализовать ее в общедоступных математических программных комплексах, обладающих инструментами численного моделирования и оптимизации.

Материалы и методы. Разработанная методика основана на разложении функции формы гибкой ванта и внешней нагрузки в тригонометрические ряды с последующим преобразованием дифференциального уравнения равновесия ванта в систему алгебраических уравнений. Интегральное выражение длины пологой ванта преобразовано в алгебраическую форму, используя выражения квадратов и четвертых степеней суммы ряда.

Результаты. Получено уравнение гибкой ванта, связывающее ее ординату, продольную жесткость, относительную деформацию и параметры внешней нагрузки. Предложены методика нахождения продольной жесткости из условия обеспечения работоспособного состояния ванта, методика расчета вертикальных перемещений от действия внешних нагрузок, а также методика нахождения стрелы и начальной длины ванта в исходном состоянии. Получено выражение для расчета длины ванта под нагрузкой и выражение для определения ординаты по известной длине.

Выводы. Разработанная методика позволяет выполнить расчет ванта на действие распределенных по длине пролета поперечных нагрузок. Коэффициенты разложения сложной нагрузки являются суммой коэффициентов отдельных составляющих. Методика нацелена на выполнение автоматизированного расчета, способствуя глубокой проработке конструкции на предпроектной стадии в части получения оптимальных параметров. Дальнейшее развитие предложенной методики находится в области анализа работы под нагрузкой не пологих вант, многоярусных вантовых систем, вантовых конструкций с балками жесткости, шпренгельных систем и пространственных покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тригонометрический ряд, ряд Фурье, пологая ванта, гибкая нить, длина ванта, функция формы, деформация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чесноков А.В., Михайлов В.В. Усовершенствованная методика расчета гибких вант // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1091–1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1091-1103

Автор, ответственный за переписку: Андрей Владимирович Чесноков, andreychess742@mail.ru.

Advanced technique for flexible cable analysis

Andrei V. Chesnokov, Vitalii V. Mikhailov

Lipetsk State Technical University (LGTU); Lipetsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Cable structures belong to perspective roof systems. Specialized software packages for structural analysis, however, do not provide optimization tools for obtaining efficient design solutions of the cable structures. Thus, development of improved methods for design and analysis of cable systems is an important task to be solved. An advanced technique for flexible cable analysis is proposed. It includes ordinary operations of summing the coefficients and their products. The technique is applicable for non-commercial mathematical software packages with numerical simulation tools included, thus providing structural optimization capabilities.

Materials and methods. The technique proposed is based on the sine-series expansion of the external load and the shape function of the flexible cable. The differential equation of cable equilibrium is thus transformed into the set of algebraic equations. The cable length is expressed in algebraic form by means of the power expressions for the sum of the series.

Results. The equation for the flexible cable is derived. It includes cable ordinate, axial stiffness, relative elongation and the external load parameters. The technique for determination of the axial stiffness of the cable is proposed under the operability conditions. The techniques for finding load-induced vertical displacements, as well as the initial cable sag and the undeformed length are given. The length of the cable under load and the ordinate given the cable length are proposed.

Conclusions. The technique for flexible cable analysis allows taking into account distributed transverse external loads. For a combined load the coefficients of the series are the sum of the particular load coefficients. The technique is intended for automated structural solution. It allows facilitating the preliminary design stage, thus providing optimal parameters determination and in-depth design study implementation. Further development of the proposed technique encompasses the fields of non-shallow cable analysis, multi-chord cable systems, cable structures with stiffening girders, strutted cable systems and spatial roof structures.

KEYWORDS: sine-series expansion, fourier series, shallow cable, flexible cable, cable length, shape function, deformation**FOR CITATION:** Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Advanced technique for flexible cable analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1091-1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1091-1103 (rus.).*Corresponding author:* Andrei V. Chesnokov, andreychess742@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вантовые системы принадлежат к числу перспективных направлений развития конструкций покрытия зданий и сооружений. Они обладают малым собственным весом и хорошей архитектурной выразительностью, а их применение способствует повышению эффективности использования высокопрочных сталей при перекрытии значительных по размеру пролетов, свободных от промежуточных опор [1, 2].

В работе [3] приводится критический анализ конструктивных решений вантовых систем с выделением области их эффективного применения. Гибкие ванты (нити), структурно объединенные со сжатоизогнутыми элементами, образуют так называемые комбинированные конструкции: арочно-вантовые [4, 5], шпренгельные [6], подвесные системы с жесткой пролетной конструкцией [7–9], комбинированные тросовые купола [10–12], а также bending-active системы [13, 14]. Комбинированные конструкции обладают большими перспективами практического применения [15].

Высокопрочные гибкие ванты выполняют разгружающую, поддерживающую и стабилизирующую роль в комбинированных конструкциях, обеспечивая выполнение требований второй группы предельных состояний [16, 17]. Они являются основными несущими элементами tensegrity-систем, в которых отдельные сжатые распорки объединяют непрерывные растянутые элементы, охватывающие конструкцию в целом [18]. Сокращение доли сжатых элементов делает tensegrity-системы перспективными для большепролетных зданий с редкой сеткой колонн.

Развитие теории гибкой нити вносит вклад в разработку методов создания предварительных напряжений в сложных вантовых конструкциях [19]. Гибкие нити находят применение для разработки упрощенных расчетных схем тентовых строительных конструкций и пневматических оболочек [20], для которых получение точного аналитического решения осложняется проявлением физически нелинейной работы материала, влиянием изменения температуры эксплуатации и вариацией внутренне-го давления воздуха [21, 22].

В исследовании [23] гибкая нить применена для создания расчетной схемы железобетонного перекрытия при разрушении несущей колонны нижерасположенного этажа с целью оценки несущей способности усиленной конструкции, а также для выполнения расчета здания на прогрессирующее обрушение. Расчетная схема гибкой нити ис-

пользуется для теоретического обоснования механизма взаимодействия податливого опорного контура и вантового покрытия, определения равновесной формы поверхности покрытия [24, 25], а также для разработки методик расчета многопролетных вантовых покрытий [26].

Анализ чувствительности комбинированных конструкций к повреждению и провисанию вантовых элементов служит неотъемлемой частью процесса оценки обеспечения их работоспособного состояния [27].

Таким образом, разработка и совершенствование методов расчета гибких вантовых элементов — важная задача, решение которой позволит повысить эффективность современной строительной отрасли.

Вывод, что анализ работы под нагрузкой вантовых строительных конструкций должен выполняться «в больших перемещениях» с учетом нелинейной зависимости между перемещениями узлов и деформациями элементов приведен в публикации [28]. Один из наиболее распространенных приемов анализа нелинейных конструкций — применение итерационных методик, позволяющих найти решение за конечное число шагов и включающих этап построения касательной матрицы жесткости деформируемой системы.

В труде [29] предложена касательная матрица жесткости двухузлового вантового элемента, учитывающая его начальную кривизну. Предложена уточненная матрица жесткости криволинейного вантового элемента в деформированном состоянии с учетом геометрической и физической нелинейности, а также изменения температуры [30]. Рассмотрены усовершенствованные вантовые элементы для применения в геометрически нелинейном конечно-элементном анализе [31].

Для определения горизонтального распора при установлении длины ванты используется метод Ньютона – Рафсона [26], который также находит применение в задаче нахождения равновесного состояния вантовой фермы, состоящей из ряда элементарных модулей [32].

Двухстадийная методика статического анализа вантовых конструкций предложена в исследовании [33]. На первой стадии для определения исходной формы гибких вантовых элементов и их начальных натяжений (преднапряжений) разработана модификация метода плотности сил catenary force density method, учитывающая собственный вес вантовых элементов. Вторая стадия, заключающаяся в анализе вантовой конструкции на действие внешних нагрузок, состоит в итерационном поиске решения путем ми-

нимизации узловых неуравновешенностей методом Ньютона – Рафсона.

Несмотря на множество преимуществ численных методов и постоянный рост доступных ресурсов современной компьютерной техники, их применение вместе с тем требует предварительного задания основных параметров вантовых конструкций. Аналитические подходы к статическому расчету, таким образом, сохраняют свою актуальность, позволяя оценить требуемые жесткостные характеристики и уровень начальных напряжений элементов вантовых систем [34].

Уравнения равновесия в дифференциальной форме для вантового элемента приведены в публикации [35]. В результате их интегрирования с учетом граничных условий получены перемещения концов ванты. Данный подход применим для статического анализа вантовых систем, несущих равномерно распределенные нагрузки.

С целью установления приращений распоров вантовых поясов, используемых при вычислении прогиба вантовой фермы от внешней нагрузки [36], предлагается система нелинейных уравнений, получение коэффициентов которой сопряжено с построением эпюр изгибающих моментов в фиктивной шарнирно опертой балке, а также с операциями интегрирования. Для вычисления длины ванты даны выражения [37], использующие интеграл от квадрата балочных поперечных сил (характеристика нагрузки). Статический анализ вантовых конструкций сопряжен с трудоемкими процедурами расчета коэффициентов и итерационного решения нелинейных систем.

Упрощение методик анализа строительных конструкций и составляющих их элементов достигается использованием тригонометрических рядов. В работах [38, 39] тригонометрические ряды применены для расчета мембраны и композитной балки, в труде [40] — для анализа прямоугольной пластины, в [41] — для выполнения геометрически нелинейного расчета подвесных мостов с балкой жесткости. Делается вывод, что применение тригонометрических рядов позволяет вести расчеты конструкций на действие произвольных нагрузок. Выражения для получения коэффициентов ряда имеют стандартную форму, не требуют построения эпюр внутренних силовых факторов и могут быть реализованы в программных комплексах

(ПК) математических расчетов общего назначения, например MathCad или MathLab.

Из приведенного литературного обзора следует вывод о том, что, несмотря на хорошо проработанные к настоящему времени численные методы расчета вантовых систем, реализуемые в специализированных ПК конечно-элементного анализа, аналитические подходы к статическому расчету сохраняют свою актуальность, позволяя получить оптимальные параметры вантовых конструкций, а также служа инструментом оценки правильности принятых расчетных схем и полученных численными методами результатов.

Среди основных требований, предъявляемых к аналитическим решениям, можно выделить их применимость в ПК математических расчетов общего назначения, обладающих широким спектром инструментов численного моделирования для решения задач оптимизации и аппроксимации, а также для графического представления полученных результатов. Разработанные к данному моменту аналитические решения для гибких вант вместе с тем связаны с решением систем нелинейных уравнений, а также с построением и последующим интегрированием эпюр поперечных сил или изгибающих моментов в фиктивной балке, что представляет сложности при выполнении практических расчетов.

Цель исследования — разработка эффективного инструмента анализа гибких вант, требующего выполнения однотипных операций суммирования коэффициентов и их произведений, реализуемых в ПК математических расчетов общего назначения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема одиночной ванты представляет собой гибкую нить, подверженную действию внешней распределенной нагрузки и закрепленную в опорных узлах (рис. 1).

Приняты следующие предпосылки для дальнейших расчетов. Опорные узлы неподвижны, внешние нагрузки действуют вертикально, а материал работает в линейно-упругой стадии. В исходном (условно ненапряженном) состоянии ванта подвержена действию бесконечно малой поперечной нагрузки, задающей ее начальную форму. Рас-

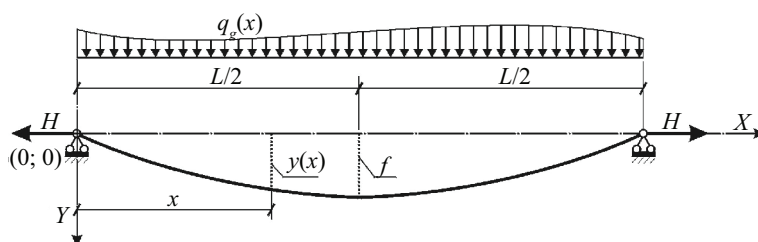


Рис. 1. Расчетная схема гибкой ванты

Fig. 1. Design diagram of the flexible cable

смотрены только пологие ванты, подчиняющиеся следующему условию:

$$k \in [k_{\text{lim},1} \dots k_{\text{lim},2}], \quad (1)$$

где $k_{\text{lim},1} = 1/24$, $k_{\text{lim},2} = 1/8$, — границы диапазона k , являющегося отношением стрелы ванта f к пролету L :

$$k = f/L. \quad (2)$$

С учетом пологости ванта вариация усилия $N(x)$ по длине незначительна и можно записать приближенное равенство:

$$N(x) \approx H, \quad (3)$$

где H — горизонтальная реакция (распор).

Представим форму ванта и внешнюю нагрузку в виде тригонометрических рядов:

$$y(x) = \sum_{m=1}^{n_M} \psi_m \cdot \sin(m \cdot \pi \cdot x/L); \quad (4)$$

$$q(x) = \sum_{m=1}^{n_M} kq_m \cdot \sin(m \cdot \pi \cdot x/L), \quad (5)$$

где $y(x)$ — функция формы ванта; $q(x)$ — функция, аппроксимирующая заданную внешнюю поперечную нагрузку на ванту $q_g(x)$; m — номер элемента ряда; n_M — число учитываемых элементов; ψ_m и kq_m — коэффициенты рядов, представленные в векторной форме:

$$\vec{\psi} = (\psi_1 \dots \psi_m \dots \psi_{n_M})^T; \quad (6, a)$$

$$\vec{kq} = (kq_1 \dots kq_m \dots kq_{n_M})^T. \quad (6, б)$$

Коэффициенты разложения внешней нагрузки [42]:

$$kq_m = \frac{2}{L} \cdot \int_0^L \left(q_g(x) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \right) dx. \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение гибкой ванта, подверженной внешней поперечной нагрузке [37], с учетом формулы (3):

$$\frac{d^2}{dx^2} y(x) = \frac{-q(x)}{N}, \quad (8)$$

где $N = N(\bar{\psi})$ — среднее продольное усилие в ванте, определяемое по закону Гука вследствие линейной упругости материала:

$$N = EA \cdot \varepsilon_c, \quad (9)$$

где EA — жесткость ванта на растяжение; $\varepsilon_c = \varepsilon(\bar{\psi})$ — относительная деформация:

$$\varepsilon_c = \frac{L_g}{L_{c,0}} - 1, \quad (10)$$

где $L_g = L_g(\bar{\psi})$ — длина ванта под нагрузкой; $L_{c,0}$ — начальная длина ванта в исходном состоянии.

Начальная длина одиночной ванта $L_{c,0}$ совпадает с так называемой геометрической длиной кривой, имеющей ординату (стрелу) в центре пролета f_0 в исходном (условно ненапряженном) состоянии. Длина ванта под нагрузкой представляет собой геометрическую длину кривой L_g , определяемой функцией формы (4), на участке между опорными узлами. С учетом пологости геометрическая длина может быть выражена следующим образом [37]:

$$L_g = \int_0^L \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{dy(x)}{dx} \right)^2 - \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{dy(x)}{dx} \right)^4 \right) dx. \quad (11)$$

Представим производную от функции $y(x)$ (4) в виде суммы ряда A_m :

$$\frac{d}{dx} y(x) = \frac{\pi}{L} \cdot \sum_{m=1}^{n_M} A_m, \quad (12)$$

где

$$A_m = m \cdot \psi_m \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{L} \cdot x\right). \quad (13)$$

Для выражения длины ванта (11) через коэффициенты функции формы применим выражения для суммы ряда A_m , возведенной во вторую и четвертую степени:

$$\left(\sum_{m=1}^{n_M} A_m \right)^2 = \sum_{m_1=1}^{n_M} \sum_{m_2=1}^{n_M} A_{m_1} \cdot A_{m_2}; \quad (14)$$

$$\left(\sum_{m=1}^{n_M} A_m \right)^4 = \sum_{m_1=1}^{n_M} \sum_{m_2=1}^{n_M} \sum_{m_3=1}^{n_M} \sum_{m_4=1}^{n_M} A_{m_1} \cdot A_{m_2} \cdot A_{m_3} \cdot A_{m_4}. \quad (15)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основное уравнение гибкой ванта

Подставив функцию формы гибкой ванта (4) и внешнюю нагрузку (5) в дифференциальное уравнение (8), получим зависимость компонентов вектора $\vec{\psi}$ от коэффициентов разложения нагрузки kq_m :

$$m^2 \cdot \frac{\psi_m}{kq_m} = \frac{1}{N(\bar{\psi})} \cdot \frac{L^2}{\pi^2}, \quad (16)$$

где $m = 1 \dots n_M$.

При $kq_m = 0$ имеет место тривиальное решение: $\psi_m = 0$. Ненулевые коэффициенты функции формы ψ_m имеют место при $kq_m \neq 0$. Правые части всех уравнений, входящих в выражение (16), не зависят от индекса m и являются одинаковыми при заданном векторе $\bar{\psi}$. Таким образом, для левых частей, соответствующих индексам m и j , можно записать равенство:

$$m^2 \cdot \frac{\psi_m}{kq_m} = j^2 \cdot \frac{\psi_j}{kq_j} \quad (17)$$

при $kq_m \neq 0$ и $kq_j \neq 0$.

Из формулы (17) получена зависимость между коэффициентами ряда (4):

$$\psi_m = (j/m)^2 \cdot k_{m,j} \cdot \psi_j, \quad (18)$$

где $k_{m,j}$ — приведенный коэффициент разложения нагрузки по базовому индексу j :

$$k_{m,j} = kq_m / kq_j. \quad (19)$$

Приведенные коэффициенты зависят от типа внешней нагрузки и не зависят от ее интенсивности. Так как ряд (4) — убывающий, следует принимать как можно меньший базовый индекс при условии $kq_j \neq 0$. Для всех нагрузок, кроме обратно симметричных, рекомендуется $j = 1$, в то время как для обратно симметричных нагрузок: $j = 2$.

Подставив выражение (18) в (16), получено уравнение для определения неизвестного коэффициента функции формы ψ_j :

$$\psi_j = \frac{kq_j}{N(\psi_j)} \cdot \frac{L^2}{j^2 \cdot \pi^2}. \quad (20)$$

Для получения усилия в ванте $N(\psi_j)$ необходимо выразить длину ванты в зависимости от коэффициента ψ_j . Подставив (14) и (15) в (11), с учетом (12), получим длину ванты в следующем виде:

$$L_g = L + \frac{\pi^2}{2 \cdot L^2} \cdot \sum_{m_1=1}^{n_M} \sum_{m_2=1}^{n_M} v_{m_1} \cdot v_{m_2} \cdot I_{m_1, m_2} - \dots \\ \dots - \frac{\pi^4}{8 \cdot L^4} \sum_{m_1=1}^{n_M} \sum_{m_2=1}^{n_M} \sum_{m_3=1}^{n_M} \times \\ \times \sum_{m_4=1}^{n_M} v_{m_1} \cdot v_{m_2} \cdot v_{m_3} \cdot v_{m_4} \cdot I_{m_1, m_2, m_3, m_4}, \quad (21)$$

где $v_{m_i} = m_i \cdot \psi_{m_i}$, $m_i \in [1 \dots n_M]$; I — интегральные выражения произведения тригонометрических функций:

$$I_{m_1, m_2} = \int_0^L \cos(\tau_{m_1} \cdot x) \cdot \cos(\tau_{m_2} \cdot x) dx; \quad (22, a)$$

$$I_{m_1, m_2, m_3, m_4} = \int_0^L \cos(\tau_{m_1} \cdot x) \cdot \cos(\tau_{m_2} \cdot x) \times \\ \times \cos(\tau_{m_3} \cdot x) \cdot \cos(\tau_{m_4} \cdot x) dx, \quad (22, б)$$

где $\tau_{m_i} = m_i \cdot \pi / L$.

Преобразовав выражения (22, а) и (22, б), получим:

$$I_{m_1, m_2} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i_1=1}^2 \frac{\sin \left[\left((-1)^{i_1} \cdot \tau_{m_1} + \tau_{m_2} \right) \cdot L \right]}{(-1)^{i_1} \cdot \tau_{m_1} + \tau_{m_2}}, \quad (23, a)$$

$$I_{m_1, m_2, m_3, m_4} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \times \\ \times \sum_{i_3=1}^2 \frac{\sin \left[\left((-1)^{i_1} \cdot \tau_{m_1} + (-1)^{i_2} \cdot \tau_{m_2} + \right. \right. \\ \left. \left. + (-1)^{i_3} \cdot \tau_{m_3} + \tau_{m_4} \right) \cdot L \right]}{(-1)^{i_1} \cdot \tau_{m_1} + (-1)^{i_2} \cdot \tau_{m_2} + (-1)^{i_3} \cdot \tau_{m_3} + \tau_{m_4}}. \quad (23, б)$$

Учитывая, что индексы m_i являются целыми положительными числами, числители выражений (23, а) и (23, б) стремятся к нулю. Таким образом, ненулевые слагаемые в суммах (23, а) и (23, б) будут лишь при условии, когда их знаменатели также стремятся к нулю:

$$D_{m_1, m_2}^{i_1} = (-1)^{i_1} \cdot m_1 + m_2 \rightarrow 0; \quad (24, a)$$

$$D_{m_1, m_2, m_3, m_4}^{i_1, i_2, i_3} = (-1)^{i_1} \cdot m_1 + (-1)^{i_2} \cdot m_2 + (-1)^{i_3} \times \\ \times m_3 + m_4 \rightarrow 0, \quad (24, б)$$

где i_1, i_2, i_3 — индексы, принимающие значения 1 или 2.

Учитывая, что

$$\lim_{a \rightarrow 0} \left(\frac{\sin(a \cdot L)}{a} \right) \rightarrow L, \quad (25)$$

преобразуем выражения (23, а) и (23, б):

$$I_{m_1, m_2} = L/2 \text{ при условии } m_1 = m_2; \quad (26, a)$$

$$I_{m_1, m_2} = 0 \text{ при условии } m_1 \neq m_2 \quad (26, б)$$

и

$$I_{m_1, m_2, m_3, m_4} = \frac{L}{8} \cdot \vartheta_{m_1, m_2, m_3, m_4}, \quad (27)$$

где $\vartheta_{m_1, m_2, m_3, m_4}$ — количество нулевых комбинаций при заданных значениях индексов m_i : $D_{m_1, m_2, m_3, m_4}^{i_1, i_2, i_3} = 0$.

Учитывая формулы (26), (27) и (18), преобразуем выражение для длины ванты (21) к следующему виду:

$$L_g(\psi_j) = L + \chi_2 \cdot \psi_j^2 - \chi_4 \cdot \psi_j^4, \quad (28)$$

где χ_2 и χ_4 — коэффициенты:

$$\chi_2 = \frac{\pi^2 \cdot j^4}{4 \cdot L} \sum_{m_1=1}^{n_M} \xi_{m_1}^2; \quad (29, a)$$

$$\chi_4 = \frac{\pi^4 \cdot j^8}{64 \cdot L^3} \cdot \sum_{m_1=1}^{n_M} \sum_{m_2=1}^{n_M} \sum_{m_3=1}^{n_M} \xi_{m_1} \times \\ \times \xi_{m_2} \cdot \xi_{m_3} \cdot \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \sum_{i_3=1}^2 \xi_{m_4} \quad (29, б)$$

при

$$m_4 = (-1)^{i_1} \cdot m_1 + (-1)^{i_2} \cdot m_2 + (-1)^{i_3} \cdot m_3. \quad (30)$$

Коэффициенты $\xi_{m_1} \dots \xi_{m_3}$ являются отношениями приведенных коэффициентов разложения нагрузки к соответствующему номеру элемента ряда:

$$\xi_m = k_{m,j} / m. \quad (31)$$

Коэффициент ξ_{m_4} также определяется по формуле (31), если значение m_4 , найденное по выражению (30), принадлежит интервалу $[1 \dots n_m]$. При

$m_4 \notin [1 \dots n_m]$ коэффициент ξ_{m_4} принимается равным нулю.

Подставив формулу (18) в (4), получим ординату ванты в заданной точке пролета $x \in (0 \dots L)$ в зависимости от коэффициента ψ_j :

$$y(x) = \psi_j \cdot \Psi(x), \quad (32)$$

где $\Psi(x)$ — следующая функция:

$$\Psi(x) = j^2 \cdot \sum_{m=1}^{n_M} \mu_m \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{L}\right), \quad (33)$$

где μ_m — коэффициент:

$$\mu_m = k_{m,j} / m^2. \quad (34)$$

Выразив коэффициент ψ_j из выражения (32) и подставив его в формулу (28), получим зависимость длины ванты от типа внешней нагрузки, определяемого коэффициентами $k_{m,j}$, и ее ординаты $y(x)$:

$$L_g = \Phi_4(x) \cdot y(x)^4 + \Phi_2(x) \cdot y(x)^2 + L, \quad (35)$$

где

$$\Phi_4(x) = -\chi_4 / \Psi(x)^4; \quad (36, a)$$

$$\Phi_2(x) = \chi_2 / \Psi(x)^2. \quad (36, б)$$

Подставив выражения (9) и (32) в (20), учитывая (10), получим основное уравнение одиночной ванты, связывающее ее ординату $y(x)$ в точке x , продольную жесткость EA , относительную деформацию ϵ_c и параметры внешней нагрузки:

$$y(x) = \left(\frac{L}{j \cdot \pi}\right)^2 \cdot \frac{\Psi(x) \cdot kq_j}{EA \cdot \epsilon_c}, \quad (37)$$

где kq_j — коэффициент разложения внешней нагрузки (7), имеющий индекс j .

Учитывая, что компоненты (37), за исключением ординаты $y(x)$ и функции $\Psi(x)$, не зависят от абсциссы x , запишем соотношение между ординатами ванты:

$$y(x) = y(x_g) \cdot \frac{\Psi(x)}{\Psi(x_g)}, \quad (38)$$

где x и x_g — абсциссы двух узлов ванты в пределах пролета; $y(x)$ и $y(x_g)$ — ординаты данных узлов.

Для широко распространенного на практике случая действия нагрузки, состоящей из равномерного нагружения левой и правой половин пролета интенсивностью q_L и q_R , при $q_L \neq -q_R$ получено выражение значения функции (33) в центре пролета (при $x = L/2$):

$$\Psi_c^* = \pi^3 / 32. \quad (39)$$

Из (39) видно, что при данном характере нагружения ванты значение функции (33) в центре пролета не зависит от значений q_L и q_R (за исключением

случая $q_L = -q_R$) и является константой, а выражение (38) принимает упрощенный вид:

$$y(x) = f \cdot \Psi(x) / \Psi_c^*, \quad (40)$$

где $f = y(L/2)$.

Расчет ванты на действие наиболее неблагоприятной внешней нагрузки

Продольная жесткость ванты EA , подверженной действию внешней нагрузки q_g и имеющей заданную ординату $y(x)$ и относительную деформацию ϵ_c , определяется из решения уравнения (37). Выбор нагрузки q_g из множества нагрузок $q_{g,i}$, действующих на ванту, следует осуществлять по максимуму произведения:

$$D_i = \Psi(L/2) \cdot kq_i. \quad (41)$$

Величина D_i является аналогом так называемой «грузовой характеристики», которая используется в работе [37] для выбора предельной нагрузки, т.е. нагрузки, создающей наибольшее растягивающее усилие в ванте.

Для назначения величины относительной деформации ϵ_c запишем условия обеспечения несущей способности и нормальной эксплуатации вантового элемента:

$$\Theta_{\lim,1} \leq \Theta_c \leq \Theta_{\lim,2}, \quad (42)$$

где $\Theta_{\lim,1} \dots \Theta_{\lim,2}$ — допустимый диапазон для Θ_c , являющегося отношением нормального напряжения в ванте σ_c к ее расчетному сопротивлению R_c (коэффициент использования несущей способности):

$$\Theta_c = \frac{\sigma_c}{R_c \cdot \gamma_c}, \quad (43)$$

где γ_c — коэффициент, учитывающий неравномерность усилий по длине ванты:

$$\gamma_c = \frac{H}{N_{\max}}, \quad (44, a)$$

где H — распор в ванте; $N_{\max}$ — максимальное усилие в ванте.

При равномерной поперечной нагрузке, действующей на ванту:

$$\gamma_c = \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot k^2}}, \quad (44, б)$$

где k — отношение стрелы ванты к пролету (2).

С учетом формулы (1) диапазон изменения коэффициента γ_c составит:

$$\gamma_c \in [0,89 \dots 0,98]. \quad (44, в)$$

Применяя закон Гука, запишем отношение Θ_c (43) через относительную деформацию вантового элемента ϵ_c :

$$\Theta_c = \frac{\epsilon_c}{\zeta_c}, \quad (45)$$

где ζ_c — предельно допустимая деформация:

$$\zeta_c = \frac{R_c \cdot \gamma_c}{E_c}, \quad (46)$$

где E_c — модуль упругости ванты.

Учитывая формулы (42) и (45), запишем допустимый диапазон относительных деформаций вантового элемента:

$$\varepsilon_c \in [\varepsilon_{c,1} \dots \varepsilon_{c,2}], \quad (47)$$

где $\varepsilon_{c,1} = \Theta_{\lim,1} \cdot \zeta_c$ и $\varepsilon_{c,2} = \Theta_{\lim,2} \cdot \zeta_c$.

Для диапазона $\Theta_{\lim,1} \dots \Theta_{\lim,2}$ предлагается принять следующие граничные значения: $\Theta_{\lim,1} = 0,01$ и $\Theta_{\lim,2} = 1,0$. При этом верхняя граница $\Theta_{\lim,2}$ соответствует максимально допустимому напряжению, не приводящему к разрыву ванты, в то время как нижняя граница диапазона $\Theta_{\lim,1}$ соответствует минимальному растягивающему напряжению, обеспечивающему работоспособное состояние вантового элемента.

Таким образом, выбрав относительную деформацию ванты ε_c из допустимого диапазона (47), производится определение ее продольной жесткости EA по выражению (37) при ординате $y_q(x)$, которую должна иметь ванта под действием данной нагрузки.

В случае, если вместо ординаты $y_q(x)$ заданной является стрела ванты f_0 в исходном состоянии, для нахождения продольной жесткости необходимо предварительно определить значение $y_q(x)$ в соответствии со следующим алгоритмом:

- найти начальную длину ванты $L_{c,0}$ по формуле (35) при $y = f_0$ и коэффициентах Φ_2 и Φ_4 , полученных по (36, а) и (36, б) для нагрузки исходного состояния;
- найти длину ванты L_g под заданной нагрузкой из выражения (10) при относительной деформации ε_c , выбранной из допустимого диапазона (47);
- определить искомую ординату $y_q(x)$ при известной длине L_g и коэффициентах Φ_2 и Φ_4 , полученных по выражениям (36, а) и (36, б) для заданной нагрузки q_g и абсциссы x :

$$y(x) = \frac{\sqrt{-2 \cdot \Phi_4 \cdot \left(\Phi_2 - \sqrt{\Phi_2^2 + 4 \cdot \Phi_4 \cdot (L_g - L)} \right)}}{-2 \cdot \Phi_4}. \quad (48, а)$$

В частном случае при равномерно распределенной нагрузке ордината ванты длиной L_g пролетом L в сечении $x_c = L/2$ составит:

$$f = y(x_c) = \frac{L}{2} \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \times \sqrt{1 - \sqrt{1 - 3,6 \cdot \left(\frac{L_g}{L} - 1 \right)}}. \quad (48, б)$$

Для проверки деформативности ванты производится определение вертикальных перемещений относительно исходного состояния:

$$\Delta y(x) = y(x) - y_0(x), \quad (49)$$

где $y(x)$ — ордината ванты при действии нагрузки q_g (38); $y_0(x)$ — ордината ванты исходного состояния.

Если стрела в исходном состоянии f_0 и начальная длина ванты $L_{c,0}$ неизвестны, их определение выполняется в следующей последовательности, требуется:

- найти значения функций (36, а) и (36, б) при заданной нагрузке q_g и абсциссе узла ванты x_g ;
- найти длину ванты под нагрузкой L_g (35) при известной ординате узла ванты $y(x_g)$;
- найти начальную длину ванты $L_{c,0}$ (10) при известной длине L_g и относительной деформации ε_c ;
- определить искомую стрелу f_0 при $L_g = L_{c,0}$ для равномерно распределенной нагрузки исходного состояния по выражению (48, б), в общем случае — по (48, а).

Вертикальные перемещения узлов ванты от действия всех внешних нагрузок

Рассмотрим действие нагрузки p , которая отличается от нагрузки q_g . Продольная жесткость ванты EA , а также стрела в исходном состоянии f_0 и начальная длина ванты $L_{c,0}$, найденные для нагрузки q_g , должны остаться неизменными. Выразим ординату ванты в центре пролета f_p :

$$f_p = f_0 + \Delta f_p, \quad (50)$$

где Δf_p — искомое вертикальное перемещение в центре пролета от нагрузки p относительно исходного состояния.

Подставив выражения (10) и (50) в (37), учитывая формулу (35) при $x = L/2$ и $y(x) = f_p$, получим нелинейное уравнение относительно искомого приращения Δf_p . Учитывая, что величины перемещений намного меньше, чем геометрические размеры конструкции, предлагается отбросить члены уравнения, содержащие перемещения в третьей и более высоких степенях. Получив таким образом квадратное уравнение, решение которого может быть записано в следующем виде:

$$\Delta f_p = \frac{-A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4 \cdot A_2 \cdot (A_3 - A_0 \cdot f_0)}}{2 \cdot A_2}, \quad (51)$$

где A_0, A_1, A_2 и A_3 — коэффициенты:

$$A_0 = \Phi_4 \cdot f_0^4 + \Phi_2 \cdot f_0^2 + L - L_{c,0}; \quad (52, а)$$

$$A_1 = A_0 + 2 \cdot f_0^2 \cdot [2 \cdot \Phi_4 \cdot f_0^2 + \Phi_2]; \quad (52, б)$$

$$A_2 = f_0 \cdot [10 \cdot \Phi_4 \cdot f_0^2 + 3 \cdot \Phi_2]; \quad (52, в)$$

$$A_3 = \frac{kq_j}{EA} \cdot \frac{L^2}{j^2 \cdot \pi^2} \cdot L_{c,0} \cdot \Psi_x, \quad (52, г)$$

где Ψ_x , Φ_2 и Φ_4 — коэффициенты, вычисляемые для нагрузки p в сечении с абсциссой $x = L/2$ по уравнениям (33) и (36); kq_j — коэффициент разложения внешней нагрузки p (7), имеющий индекс j .

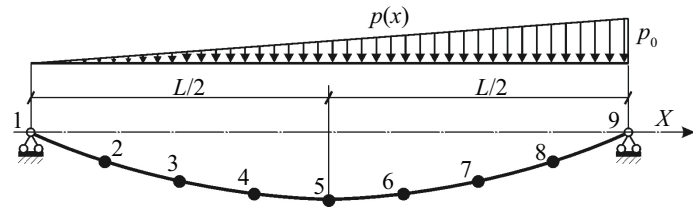


Рис. 2. Схема ванты к численному примеру: показана нумерация узлов и схема действия внешней нагрузки
Fig. 2. Diagram of the cable for the numerical example: node numbering and the external load are shown

Вертикальные перемещения узлов ванты в произвольном сечении x в пределах пролета определяются по формуле (49) с использованием (38), где $y(x_g)=f_p$, а значения функции Ψ вычисляются по (33) для нагрузки p , в сечениях с абсциссами x и $x_g=L/2$.

Численный пример

Рассмотрим ванту пролетом $L=40$ м, несущую нагрузку, распределенную по треугольнику с максимумом на правой опоре: $p(x)=p_0 \cdot x/L$, где $p_0=4,905$ кН/м (0,5 тс/м) [43]. Расчетная схема ванты с обозначением номеров узлов, расположенных с шагом 5,0 м по длине пролета, приведена на рис. 2. Начальная длина ванты задана и составляет $L_{c,0}=41$ м. Продольная жесткость ванты $EA=9,633 \cdot 10^4$ кН (арматурная сталь с модулем упругости $2 \cdot 10^6$ кгс/см² и площадью поперечного сечения 4,91 см²).

Ордината в центре пролета под нагрузкой p без учета деформирования ванты найдена из выражения (48, а) при $L_g=L_{c,0}$ и коэффициентах $\Phi_2=0,0711$ и $\Phi_4=-1,35 \cdot 10^{-4}$ (36) для $x=L/2$: $y_5=3,803$ м, где нижний индекс означает номер узла по рис. 2. Ординаты остальных узлов ванты получены из формулы (38) при $x=5,0 \cdot (i-1)$, где i — номер узла; $x_g=L/2$; $y(x_g)=y_5$; $\Psi(x_g)=0,969$ (33). Вертикальное перемещение узла ванты в центре пролета от действия внешней нагрузки получено по выражению (51): $\Delta f_p=0,104$ м. Ордината ванты в центре пролета в деформированном состоянии:

$f_p=3,907$ м. Ординаты ванты во всех рассматриваемых сечениях и узловые перемещения получены по формулам (38) и (49).

Сравнение результатов предложенной методики и результатов, полученных в работе [43], приведено в таблице. Процентные расхождения определены по формуле:

$$\varpi = 200 \cdot \frac{|V_1 - V_2|}{|V_1 + V_2|}, \quad \%, \tag{53}$$

где V_1 и V_2 — сравниваемые значения.

Длина ванты под нагрузкой получена по формуле (35) при $y(x)=f_p$. Относительная деформация ванты и продольное усилие найдены по выражениям (9) и (10): $\epsilon_c=1,304 \cdot 10^{-3}$ и $N=125,6$ кН. Расхождение с усилием, приведенным в публикации [43] $N_e=127,3$ кН (12,98 тс), составляет $\varpi=1,34\%$ (53).

При найденной ординате в центре пролета f_p и относительной деформации под нагрузкой ϵ_c оценим величину продольной жесткости ванты по формуле (37): $EA_{chk}=9,628 \cdot 10^4$ кН. Расхождение с заданной жесткостью EA составляет 0,05 % (53).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложена методика статического анализа гибкой ванты, основанная на применении тригонометрических рядов для решения дифференциального уравнения равновесия. Методика позволяет

Сравнение ординат недеформированной ванты и вертикальных перемещений от действия внешней нагрузки, полученных по предложенной методике, с результатами работы [43]

Comparison of the cable ordinates in the undeformed state and load-induced vertical displacements, obtained by means of the proposed technique, with the results by [43]

Номер узла ванты Node number of the cable	Ординаты Ordinates			Вертикальные перемещения Vertical displacements		
	Предложенная методика, мм The proposed technique, mm	Результаты работы [43], мм Results by [43], mm	Расхождение ϖ , % (53) Discrepancy ϖ , % (53)	Предложенная методика, мм The proposed technique, mm	Результаты работы [43], мм Results by [43], mm	Расхождение ϖ , % (53) Discrepancy ϖ , % (53)
2	1248	1233	1,21	34	34	0,00
3	2377	2349	1,18	65	64	1,55
4	3268	3231	1,14	89	87	2,27
5	3803	3761	1,11	104	101	2,93
6	3862	3822	1,04	105	103	1,92
7	3327	3297	0,91	91	89	2,22
8	2080	2069	0,53	57	56	1,77

выполнять расчет вант на действие произвольных поперечных нагрузок. Коэффициенты разложения внешней нагрузки (7) могут быть найдены для составляющих нагрузки по отдельности и затем просуммированы для получения коэффициентов разложения нагрузки в целом.

Получено уравнение гибкой ванты, связывающее ее ординату, продольную жесткость, относительную деформацию и параметры внешней нагрузки. Предложены методика для определения продольной жесткости ванты в зависимости от заданной относительной деформации, принятой из допустимого диапазона, методика для нахождения вертикальных перемещений ванты от внешней нагрузки, методика определения формы ванты под нагрузкой, а также методика нахождения стрелы и начальной длины ванты в исходном состоянии.

Приведены выражения для получения коэффициентов (29), (33), (36), используемых при расчете длины ванты, которые в отличие от предшествующих работ не требуют построения и последующего интегрирования эпюр поперечных сил и изгибающих моментов в фиктивной шарнирно опертой балке, но содержат однотипные операции суммирования коэффициентов и их произведений. Это более предпочтительно с точки зрения выполнения автоматизированного расчета, способствуя упрощению численного моделирования и оптимизации вантовых конструкций при помощи математических программных комплексов.

Результаты работы вносят вклад в развитие методов анализа многоярусных вантовых систем, вантовых конструкций с балками жесткости, шпренгельных систем и пространственных вантовых покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Энгель Х.* Несущие системы / пер. с нем. Л.А. Андреевой. М.: АСТ Астрель, 2007. 344 с.
2. *Zhang Z., Dong S., Fu X.* Structural design of lotus arena: a large-span suspen-dome roof // *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. Issue 3. Pp. 129–142. DOI: 10.1260/026635109789867634
3. *Еремеев П.Г.* Висячие конструкции // *Строительные материалы*. 2022. № 10. С. 62–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-62-67. EDN HOJHSN.
4. *Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Долгушева В.В.* Проблемы применения и проектирования арочных комбинированных систем // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 2. С. 25–35. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.25. EDN PKRRXZ.
5. *Еремеев П.Г., Киселев Д.Б.* Современные арочно-вантовые комбинированные конструкции // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2005. № 9. С. 11–16. EDN YPOPTI.
6. *Llorens J.* Detailing masts // *Proceedings of the IASS Annual Symposium. Structural membranes* 2019. 2019. Pp. 359–366.
7. *Arellano H., Gomez R., Tolentino D.* Parametric analysis of multi-span cable-stayed bridges under alternate loads // *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2019. Vol. 14. Issue 4. Pp. 543–567. DOI: 10.7250/bjrbe.2019-14.457
8. *Al-Rousan R.* The impact of cable spacing on the behavior of cable-stayed bridges // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 7 (91). Pp. 49–59. DOI: 10.18720/MCE.91.5. EDN YJWAIV.
9. *Mushchanov V., Protopopov I., Korsun O., Garifullin M.* Definition of the rational geometry of the cable-beam cover over stadium tribunes // *Proceedings of the 11th International Conference on Bridge Engineering*. 2015. Vol. 117. Pp. 1001–1012. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.209
10. *Yan X., Yang Y., Chen Z., Ma Q.* Mechanical properties of a hybrid cable dome under non-uniform snow distribution // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 153. Pp. 519–532. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.10.022
11. *Xue Y., Luo Y., Wang Y., Xu X., Wan H.P. et al.* A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables: Computational framework and structural feasibility investigation // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 286. P. 116028. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116028
12. *Krishnan S.* Structural design and behavior of prestressed cable domes // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. P. 110294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110294
13. *Lienhard J., Alpermann H., Gengnagel C., Knippers J.* Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process // *International Journal of Space Structures*. 2013. Vol. 28. Issue 3–4. Pp. 187–196. DOI: 10.1260/0266-3511.28.3-4.187
14. *Mazzola C., Stimpfle B., Zanelli A., Canobbio R.* TemporActive Pavilion: first loop of design and prototyping of an ultra-lightweight temporary architecture // *Proceedings of the TensiNet Symposium*. 2019. Pp. 390–401.
15. *Еремеев П.Г.* Металлические комбинированные конструкции покрытий // *Вестник НИЦ Строительство*. 2019. № 2 (21). С. 30–40. EDN XGKKKL.
16. *Ситников И.П., Голиков А.В.* Регулирование усилий в большепролетных конструкциях при разработке рациональной конструктивной формы здания дельфинария в Волгограде // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*.

2018. Т. 14. № 4. С. 278–292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292. EDN XXRMGL.

17. Окунева М.А., Сахарова Д.В., Хазов П.А. Самосогласованная система «несущие конструкции — упругое основание» с применением предварительно напряженных вантовых элементов // Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 81–87. EDN OLITFZ.

18. Еремеев П.Г. Вантовая комбинированная конструктивная система «Тенсегрити» // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 1. С. 21–27. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.21-27. EDN XVAVUG.

19. Zhao Y., Guo J., Jiang Z., Chen W., Zhou G. Control method for determining feasible pre-stresses of cable-struts structure // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 174. P. 109159. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109159

20. Еремеев П.Г. Тентовые мембраны для ограждающих конструкций покрытий над трибунами стадионов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 4. С. 33–36. EDN TPXBCT.

21. Wagner R. Simplified design tools for single/double curved membranes and inflated cushions // International Journal of Space Structures. 2008. Vol. 23. Issue 4. Pp. 233–241. DOI: 10.1260/026635108786959843

22. Borgart A. An approximate calculation method for air inflated cushion structures for design purposes // International Journal of Space Structures. 2010. Vol. 25. Issue 2. Pp. 83–91. DOI: 10.1260/0266-3511.25.2.83

23. Краснощеков Ю.В., Макеев С.А., Красотина Л.В. Применение схемы гибкой нити для расчета перекрытий при аварийном отказе колонны связевого каркаса // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 4 (48). С. 11–20. EDN ZVZSUP.

24. Xue S., Li X., Liu Y. Advanced form finding of cable roof structures integral with supporting frames: numerical methods and case studies // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 60. P. 105204. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105204

25. Nie R., He B., Hodges D.H., Ma X. Form finding and design optimization of cable network structures with flexible frames // Computers & Structures. 2019. Vol. 220. Pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.05.004

26. Chen S., Yang M., Meng D., Hu S. Theoretical solution for multi-span continuous cable structures considering sliding // International Journal of Solids and Structures. 2020. Vol. 207. Pp. 42–54. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.09.024

27. Yuan P., He B., Nie R., Zhang L., Yu H., Wang W. et al. Member importance prediction and failure response analysis for cable network antennas // Engineering Structures. 2022. Vol. 266. P. 114642. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114642

28. Freire A.M.S., Negrão J.H.O., Lopes A.V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges // Computers & Structures. 2006. Vol. 84. Issue 31–32. Pp. 2128–2140. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.047

29. Chunjiang W., Renpeng W., Shilin D., Ruojun Q. A new catenary cable element // International Journal of

Space Structures. 2003. Vol. 18. Issue 4. Pp. 269–275. DOI: 10.1260/026635103322987986

30. Costa R.S., Lavall A.C.C., Lanna da Silva R.G., Porcino dos Santos A., Viana H.F. Cable structures: An exact geometric analysis using catenary curve and considering the material nonlinearity and temperature effect // Engineering Structures. 2022. Vol. 253. P. 113738. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113738

31. Abad M.S.A., Shooshtari A., Esmaeili V., Riahi A.N. Nonlinear analysis of cable structures under general loadings // Finite Elements in Analysis and Design. 2013. Vol. 73. Pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.finel.2013.05.002

32. Ma S., Yuan X.F., Deng M., Yang L. Minimal mass design of a new cable truss in two states // Mechanics Research Communications. 2022. Vol. 125. P. 103995. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2022.103995

33. Greco L., Impollonia N., Cuomo M. A procedure for the static analysis of cable structures following elastic catenary theory // International Journal of Solids and Structures. 2014. Vol. 51. Issue 7–8. Pp. 1521–1533. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2014.01.001

34. Wagner R. Bauen mit seilen und membranen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p.

35. Huang Y., Lan W. Static analysis of cable structure // Applied Mathematics and Mechanics. 2006. Vol. 27. Issue 10. Pp. 1425–1430. DOI: 10.1007/s10483-006-1015-y

36. Kmet S., Kokorudova Z. Non-linear closed-form computational model of cable trusses // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2009. Vol. 44. Issue 7. Pp. 735–744. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2009.03.004

37. Москалев Н.С. Конструкции висячих покрытий. М. : Стройиздат, 1980. 336 с.

38. Турусов Р.А., Андреев В.И., Цыбин Н.Ю. Общее решение задачи об изгибе многослойной балки в рядах Фурье // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 4. С. 34–42. DOI: 10.22363/1815-5235-2017-4-34-42. EDN ZHAIYZ.

39. Чернышов А.Д., Горайнов В.В., Кузнецов С.Ф., Никифорова О.Ю. Применение быстрых разложений для построения точных решений задачи о прогибе прямоугольной мембраны под действием переменной нагрузки // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 70. С. 127–142. DOI: 10.17223/19988621/70/11. EDN REGKRY.

40. Yessenbayeva G.A., Akhanov F.M., Makazhanova T.Kh. On the calculation of rectangular plates by the trigonometric series // Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2019. Vol. 94. Issue 2. Pp. 115–120. DOI: 10.31489/2019M2/115-120

41. Shah N.D., Shah D.A., Desai J.A., Patil H.S. Analysis of long span suspension bridges using series method // International Journal of Advanced Engineering Technology. 2010. Vol. 1. Issue 1. Pp. 84–94.

42. Tolstov G.P. Fourier series. Dover Publications, 2012. 352 p.

43. Дмитриев Л.Г., Касилов А.В. Вантовые покрытия (расчет и конструирование). Киев : Будівельник, 1974. 271 с.

Поступила в редакцию 9 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 27 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Владимирович Чесноков** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства; **Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)**; 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30; РИНЦ ID: 473598, Scopus: 57170021900, ResearcherID: U-4758-2018, ORCID: 0000-0003-3687-0510; andreychess742@mail.ru;

Виталий Витальевич Михайлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства; **Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)**; 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30; РИНЦ ID: 821209, Scopus: 57215327886, ResearcherID: ISU-9851-2023, ORCID: 0000-0001-8274-9346; mmvv46@rambler.ru.

Вклад авторов:

Чесноков А.В. — развитие методологии, вывод основных формул, написание исходного текста.

Михайлов В.В. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

- Engel H. *Support systems*. Moscow, AST Astrel' Publ., 2007; 344. (rus.).
- Zhang Z., Dong S., Fu X. Structural design of lotus arena: a large-span suspen-dome roof. *International Journal of Space Structures*. 2009; 24(3):129-142. DOI: 10.1260/026635109789867634
- Eremeev P.G. Hanging structures. *Construction Materials*. 2022; 10:62-67. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-62-67. EDN HOJHSN. (rus.).
- Ibragimov A.M., Gnedina L.Iu., Dolgusheva V.V. Problems of application and design of combined arc systems. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2021; 2:25-35. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.25. EDN PKRRXZ. (rus.).
- Eremeev P.G., Kiselev D.B. Modern combined arch-backstays constructions. *Mounting and Special Works in Construction*. 2005; 9:11-16. EDN YPOPTI. (rus.).
- Llorens J. Detailing masts. Proceedings of the IASS Annual Symposium. *Structural membranes 2019*. 2019; 359-366.
- Arellano H., Gomez R., Tolentino D. Parametric analysis of multi-span cable-stayed bridges under alternate loads. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2019; 14(4):543-567. DOI: 10.7250/bjrbe.2019-14.457
- Al-Rousan R. The impact of cable spacing on the behavior of cable-stayed bridges. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 7(91):49-59. DOI: 10.18720/MCE.91.5. EDN YJWAIV.
- Mushchanov V., Protopopov I., Korsun O., Garifullin M. Definition of the rational geometry of the cable-beam cover over stadium tribunes. *Procedia Engineering*. 2015; 117:1001-1012. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.209
- Yan X., Yang Y., Chen Z., Ma Q. Mechanical properties of a hybrid cable dome under non-uniform snow distribution. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 153:519-532. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.10.022
- Xue Y., Luo Y., Wang Y., Xu X., Wan H.P. et al. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables: Computational framework and structural feasibility investigation. *Engineering Structures*. 2023; 286:116028. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116028
- Krishnan S. Structural design and behavior of prestressed cable domes. *Engineering Structures*. 2020; 209:110294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110294
- Lienhard J., Alpermann H., Gengnagel C., Knippers J. Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process. *International Journal of Space Structures*. 2013; 28(3-4):187-196. DOI: 10.1260/0266-3511.28.3-4.187
- Mazzola C., Stimpfle B., Zanelli A., Canobbio R. TemporActive Pavilion: first loop of design and prototyping of an ultra-lightweight temporary architecture. *Proceedings of the TensiNet Symposium*. 2019; 390-401.
- Yeremeyev P. The metal hybrid structures of roofs. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. 2019; 2(21):30-40. EDN XGKKKL. (rus.).
- Sitnikov I.R., Golikov A.V. Adjustment of forces in large-span structures in the design of a rational constructive form of a dolphinarium in Volgograd. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018; 14(4):278-292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292. EDN XXRMGL. (rus.).

17. Okuneva M.A., Sakharova D.V., Khazov P.A. Self-consistent system "Load-bearing structures — elastic base" with the use of prestressed cable-stayed elements. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2022; 1(61):81-87. EDN OLITFZ. (rus.).
18. Yermeyev P.G. Cable-stayed combined structural system "Tensegrity". *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 1:21-27. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.21-27. EDN XVAVUG. (rus.).
19. Zhao Y., Guo J., Jiang Z., Chen W., Zhou G. Control method for determining feasible pre-stresses of cable-struts structure. *Thin-Walled Structures*. 2022; 174:109159. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109159
20. Eremeev P.G. Tent membranes for enveloping structures of roof over stadium tribunes. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 4:33-36. EDN TPXBCT. (rus.).
21. Wagner R. Simplified design tools for single/double curved membranes and inflated cushions. *International Journal of Space Structures*. 2008; 23(4):233-241. DOI: 10.1260/026635108786959843
22. Borgart A. An approximate calculation method for air inflated cushion structures for design purposes. *International Journal of Space Structures*. 2010; 25(2):83-91. DOI: 10.1260/0266-3511.25.2.83
23. Krasnoshchekov Yu.V., Makeev S.A., Krasotina L.V. Application of a chart of flexible filament for the calculation of ceiling at crash of column of framework. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017; 4(48):11-20. EDN ZVZSUP. (rus.).
24. Xue S., Li X., Liu Y. Advanced form finding of cable roof structures integral with supporting frames: numerical methods and case studies. *Journal of Building Engineering*. 2022; 60:105204. DOI: 10.1016/j.job.2022.105204
25. Nie R., He B., Hodges D.H., Ma X. Form finding and design optimization of cable network structures with flexible frames. *Computers & Structures*. 2019; 220:81-91. DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.05.004
26. Chen S., Yang M., Meng D., Hu S. Theoretical solution for multi-span continuous cable structures considering sliding. *International Journal of Solids and Structures*. 2020; 207:42-54. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.09.024
27. Yuan P., He B., Nie R., Zhang L., Yu H., Wang W. et al. Member importance prediction and failure response analysis for cable network antennas. *Engineering Structures*. 2022; 266:114642. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114642
28. Freire A.M.S., Negrao J.H.O., Lopes A.V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges. *Computers & Structures*. 2006; 84(31-32):2128-2140. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.047
29. Chunjiang W., Renpeng W., Shilin D., Ruojun Q. A new catenary cable element. *International Journal of Space Structures*. 2003; 18(4):269-275. DOI: 10.1260/026635103322987986
30. Costa R.S., Lavall A.C.C., Lanna da Silva R.G., Porcino dos Santos A., Viana H.F. Cable structures: An exact geometric analysis using catenary curve and considering the material nonlinearity and temperature effect. *Engineering Structures*. 2022; 253:113738. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113738
31. Abad M.S.A., Shooshtari A., Esmacili V., Riabi A.N. Nonlinear analysis of cable structures under general loadings. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2013; 73:11-19. DOI: 10.1016/j.finel.2013.05.002
32. Ma S., Yuan X.F., Deng M., Yang L. Minimal mass design of a new cable truss in two states. *Mechanics Research Communications*. 2022; 125:103995. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2022.103995
33. Greco L., Impollonia N., Cuomo M. A procedure for the static analysis of cable structures following elastic catenary theory. *International Journal of Solids and Structures*. 2014; 51(7-8):1521-1533. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2014.01.001
34. Wagner R. *Bauen mit seilen und membranen*. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2016; 517.
35. Huang Y., Lan W. Static analysis of cable structure. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2006; 27(10):1425-1430. DOI: 10.1007/s10483-006-1015-y
36. Kmet S., Kokorudova Z. Non-linear closed-form computational model of cable trusses. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2009; 44(7):735-744. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2009.03.004
37. Moskalev N.S. *Hanging roof structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980; 336. (rus.).
38. Turusov R.A., Andrev V.I., Tsybin N.Yu. General solution of bending of multilayer beams in fourier series. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017; 4:34-42. DOI: 10.22363/1815-5235-2017-4-34-42. EDN ZHAIYZ. (rus.).
39. Chernyshov A.D., Goryainov V.V., Kuznetsov S.F., Nikiforova O.Yu. Application of fast expansions to obtain exact solutions to a problem on rectangular membrane deflection under alternating load. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2021; 70:127-142. DOI: 10.17223/19988621/70/11. EDN REGKRY. (rus.).
40. Yessenbayeva G.A., Akhanov F.M., Makazhanova T.Kh. On the calculation of rectangular plates by the trigonometric series. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*. 2019; 94(2):115-120. DOI: 10.31489/2019M2/115-120
41. Shah N.D., Shah D.A., Desai J.A., Patil H.S. Analysis of long span suspension bridges using series method. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. 2010; 1(1):84-94.
42. Tolstov G.P. *Fourier Series*. Dover Publications Publ., 2012; 352.
43. Dmitriyev L.G., Kasilov A.V. *Cable-stayed roofs (calculation and design)*. Kiev, Budivel'nik Publ., 1974; 271. (rus.).

Received January 9, 2024.

Adopted in revised form on April 27, 2024.

Approved for publication on April 27, 2024.

B I O N O T E S: **Andrei V. Chesnokov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production; **Lipetsk State Technical University (LSTU)**; 30 Moskovskaya st., Lipetsk, 398055, Russian Federation; ID RSCI: 473598, Scopus: 57170021900, ResearcherID: U-4758-2018, ORCID: 0000-0003-3687-0510; andreychess742@mail.ru;

Vitalii V. Mikhailov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production; **Lipetsk State Technical University (LSTU)**; 30 Moskovskaya st., Lipetsk, 398055, Russian Federation; ID RSCI: 821209, Scopus: 57215327886, ResearcherID: ISU-9851-2023, ORCID: 0000-0001-8274-9346; mmvv46@rambler.ru.

Contribution of the authors:

Andrei V. Chesnokov — development of the methodology, derivation of the main mathematical expressions, preparation of the text version.

Vitalii V. Mikhailov — scientific supervision, research concept, scientific text editing, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Эффективность сейсмоизолирующего скользящего пояса при воздействии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения

Олег Вартанович Мкртычев, Салима Рафиловна Мингазова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Выполнены исследования работы монолитного железобетонного здания различной этажности с сейсмоизолирующим скользящим поясом и без него при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений. Целью исследования является оценка эффективности сейсмоизоляции в виде скользящего пояса в уровне фундамента при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений с помощью прямого нелинейного динамического метода.

Материалы и методы. При проведении исследования использовался прямой динамический метод, основанный на явной схеме интегрирования уравнения движения (метод центральных разностей). Для определения наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений применялся метод, учитывающий все наиболее значимые собственные частоты рассматриваемого здания.

Результаты. На основе расчетов определены относительные перемещения, интенсивности напряжений для здания в целом и с детализацией для наиболее нагруженного этажа. Анализ полученных результатов показал существенное снижение сдвиговых перемещений и интенсивности напряжений при использовании сейсмоизоляции в виде скользящего пояса в уровне фундамента.

Выводы. При выборе типа сейсмоизоляции стоит учитывать ее стоимость, а также трудоемкость изготовления и монтажа. Необходимо, чтобы используемые системы сейсмоизоляции были доступны для массового строительства, были менее сложными и максимально эффективными. Следует использовать апробированные материалы и технологии устройства данных систем, не требующие специфических навыков и квалификации. Сейсмоизоляция должна обеспечивать комплексную защиту от наиболее вероятных сейсмических воздействий. Проведенные исследования показывают, что сейсмоизолирующий скользящий пояс отвечает вышеперечисленным требованиям. В отличие от широко применяемых резинометаллических и маятниковых скользящих опор, сейсмоизоляция в виде скользящего пояса в уровне фундамента не требует заводского изготовления и может быть выполнена непосредственно на строительной площадке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмостойкость, активная сейсмозащита, сейсмоизоляция, сейсмоизолирующий скользящий пояс, фторопласт, нелинейный динамический метод, акселерограмма землетрясения

Благодарности. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2023-0004 «Система территориальной сейсмической защиты критически важных объектов инфраструктуры на основе гранулированных метаматериалов, обладающих свойствами широкодиапазонных фоновых кристаллов».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Мингазова С.Р. Эффективность сейсмоизолирующего скользящего пояса при воздействии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1104–1115. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1104-1115

Автор, ответственный за переписку: Салима Рафиловна Мингазова, salima.mingazova@yandex.ru.

The efficiency of the seismic isolating sliding belt under the impact of the most unfavourable earthquake accelerograms

Oleg V. Mkrtychev, Salima R. Mingazova

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

ABSTRACT

Introduction. Research was carried out on the performance of monolithic reinforced concrete buildings of varying heights with and without a seismic isolating sliding belt when subjected to the most unfavourable earthquake accelerograms. The objective of the study is to assess the effectiveness of seismic isolation in the form of a sliding belt at the foundation level under the action of the most unfavourable earthquake accelerograms using a direct nonlinear dynamic method.

Materials and methods. The study employed a direct dynamic method based on an explicit integration scheme of the equation of motion (the central difference method). To determine the most unfavourable earthquake accelerograms, a method was used that accounted for all the most significant natural frequencies of the building under consideration.

Results. Based on the calculations conducted, relative displacements and stress intensities for the building as a whole and in detail for the most loaded floor were determined. The analysis of the obtained results showed a significant reduction in shear displacements and stress intensities with the use of seismic isolation in the form of a sliding belt at the foundation level.

Conclusions. When selecting the type of seismic isolation, its cost, as well as the labour intensity of manufacturing and installation, must be considered. It is necessary for the seismic isolation systems used to be available for mass construction, less complex, and maximally effective. Proven materials and technologies for the installation of these systems, which do not require specific skills and qualifications, should be used. Seismic isolation should provide comprehensive protection against the most likely seismic impacts. Conducted research shows that the seismic isolating sliding belt meets the above requirements. Unlike widely used rubber-metallic and pendulum sliding bearings, seismic isolation in the form of a sliding belt at the foundation level does not require factory manufacturing and can be implemented directly at the construction site.

KEYWORDS: seismic resistance, active seismic protection, seismic isolation, seismic isolating sliding belt, fluoroplastic, direct dynamic method, accelerogram of earthquake

Acknowledgements. This research was supported by Ministry Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2023-0004 "A system of territorial seismic protection of critical infrastructure facilities based on granular metamaterials with the properties of wide-range phonon crystals".

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Mingazova S.R. The efficiency of the seismic isolating sliding belt under the impact of the most unfavorable earthquake accelerograms. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1104-1115. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1104-1115 (rus.).

Corresponding author: Salima R. Mingazova, salima.mingazova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Последствиями землетрясения могут быть сильные разрушения зданий и сооружений, потеря жизней и значительный материальный ущерб. Приблизительно треть территории России находится в районах, где существует вероятность возникновения землетрясений средней и высокой интенсивности. Сейсмостойкость зданий и сооружений — важный аспект обеспечения безопасности жителей, проживающих на данных территориях. Сейсмостойкое строительство остается актуальной и практически значимой задачей для строительной отрасли, особенно в районах с высокой сейсмической активностью.

Один из известных методов повышения сейсмостойкости зданий и сооружений — применение активной сейсмозащиты. В настоящее время существуют несколько ее видов, они отличаются друг от друга по принципам работы и конструктивным решениям. Одним из таких видов активной сейсмозащиты служит сейсмоизоляция [1–9]. Снижение сейсмических сил на здание при использовании сейсмоизоляции достигается путем введения в конструкцию задания специальных конструктивных элементов — сейсмоизоляторов, что позволяет сократить усилия в несущих элементах системы при землетрясении.

Наиболее популярными системами сейсмоизоляции в России и за рубежом являются резинометаллические опоры (РМО) и маятниковые скользящие опоры (МСО). Однако рассматриваемые системы сейсмоизоляции имеют ряд недостатков: для РМО — сложность изготовления, ограниченный срок службы, повышенная чувствительность к низкочастотным воздействиям; для МСО — большое влияние неточностей изготовления и монтажа, отнюдь высокая стоимость.

Рассмотрим сейсмоизолирующий скользящий пояс в уровне фундамента. Данный вид сейсмоизоляции, несмотря на ряд преимуществ, практически не используется. Связано это с недостаточной изученностью, отсутствием всесторонних расчетных обоснований и соответствующих методик расчета данных систем.

Сейсмоизолирующий скользящий пояс в уровне фундамента представляет собой устройство с поверхностью скольжения с низким значением коэффициента трения материалов между верхней частью здания и фундаментом и с ограничителем больших горизонтальных перемещений (рис. 1). В качестве материала между нижним и верхним слоями опорных элементов применяют различные материалы (неопрен, тефлон, графит и др.). При проведении исследований в качестве такого материала рассматривался фторопласт.

Принцип работы скользящего пояса следующий: когда суммарная инерционная сила системы превысит определенное значение, в опорных элементах сейсмоизолирующего пояса возникает проскальзывание, которое приводит к снижению ускорений и, соответственно, усилий в несущих элементах здания.

Многочисленные экспериментальные исследования показывают эффективность применения сейсмоизолирующего скользящего пояса в уровне фундамента для снижения сейсмической нагрузки, которая действует на надземную часть здания [10]. Несмотря на это, до настоящего времени остаются открытыми вопросы разработки адекватных математических моделей, описывающих действительную работу системы «здание – сейсмоизоляция – фундамент – основание», и соответствующих методик расчета.

Научные исследования по вопросам обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений с по-

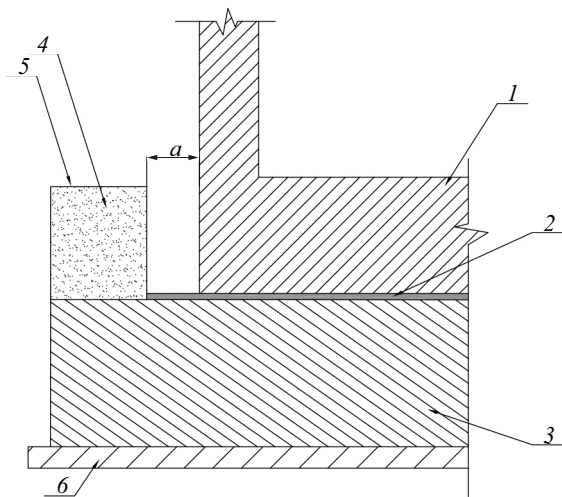


Рис. 1. Схема устройства скользящего пояса в уровне фундамента: 1 — верхний слой опорного элемента; 2 — материал с низким значением коэффициента трения; 3 — нижний слой опорного элемента; 4 — ограничитель горизонтальных перемещений (песок уплотненный); 5 — гидроизоляция; 6 — бетонная подготовка

Fig. 1. The scheme of the sliding belt device at the foundation level: 1 — top layer of the support element; 2 — low friction material; 3 — bottom layer of the support element; 4 — horizontal movement limiter (compacted sand); 5 — waterproofing; 6 — concrete preparation

мощью активной системы сейсмозащиты получили большое внимание в научных трудах Я.М. Айзенберга [11, 12], О.В. Мкртычева [13–17], Б.М. Абрамова [18], А.М. Алексеева [19], А.Н. Васюнкина [20], А.М. Уздина [3, 9], О.А. Савинова [21], Ю.Д. Черепинского [22], В.П. Чуднецова [23], В.Д. Кузнецова и Чэнь Сятин [24] и других авторов [25–33].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемыми объектами являются монолитные железобетонные здания разной высоты (трех-, пяти-, девяти-, шестнадцатизэтажные) (рис. 2) с сейсмоизоляцией и без нее при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения.

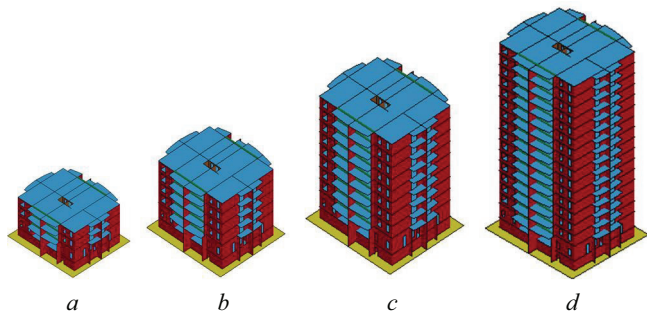


Рис. 2. Конечно-элементная схема зданий без сейсмоизоляции: а — 3 этажа; б — 5 этажей; с — 9 этажей; d — 16 этажей
Fig. 2. Finite element design scheme of a building without seismic isolation: a — 3 floors; b — 5 floors; c — 9 floors; d — 16 floors

При проведении исследования были применены следующие методы:

- моделирование (численное моделирование монолитных железобетонных зданий различной этажности с сейсмоизоляцией и без нее с последующим их расчетом на действие наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения с использованием прямого нелинейного динамического метода при явной схеме интегрирования уравнений движения);
- сравнение (сравнение реакции монолитного железобетонного здания разной высоты с сейсмоизоляцией и без нее при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения);
- анализ (все выводы, подтверждающие эффективность применения скользящего пояса в уровне фундамента для увеличения сейсмостойкости зданий, основаны на подробном анализе полученных результатов численных расчетов).

В соответствии с текущими нормативными документами при строительстве на сейсмоопасных территориях требуется проведение расчетов на основе наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений для конкретных зданий и сооружений. Однако в существующих строительных нормах отсутствуют установленные критерии для определения наиболее опасных акселерограмм землетрясений, а также отсутствуют методы их моделирования. Для формирования данных, необходимых для синтеза акселерограмм, обычно применяются сейсмические характеристики строительной площадки или анализ результатов статистической обработки набора инструментальных акселерограмм, соответствующих этой площадке. В процессе подготовки исходных данных не уделяется внимание динамическим свойствам будущей конструкции, поскольку они не оказывают влияния на сейсмические характеристики площадки строительства. Все же подготовленные исходные сведения содержат неопределенности, обусловленные случайным характером сейсмического воздействия, и подчиняются нормальному распределению. Принимая во внимание имеющиеся неопределенности, можно подобрать такие исходные данные, которые окажут наибольшее воздействие на соору-

жения. Для оценки степени опасности необходимо принимать во внимание динамические особенности сооружения. Акселерограммы, сформированные на основе указанной информации, будут считаться наиболее неблагоприятными.

При определении наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения использовался метод, который учитывает все значимые собственные частоты рассматриваемого здания [16]. Этот метод включает два этапа подготовительной работы: сначала устанавливаются характеристики сейсмического воздействия для конкретной строительной площадки, а затем проводится определение динамических характеристик рассматриваемого здания. По завершении этих этапов формируется целевая функция, которая впоследствии максимизируется с учетом ограничений, наложенных вероятностными факторами. Процесс максимизации включает анализ частотной характеристики системы (рис. 3, а) в сочетании с частотной характеристикой акселерограммы с целью достижения максимальной дисперсии реакции системы (рис. 3, б).

После этого формируются исходные данные для моделирования акселерограмм и производится их синтезирование с помощью метода канонических разложений [15].

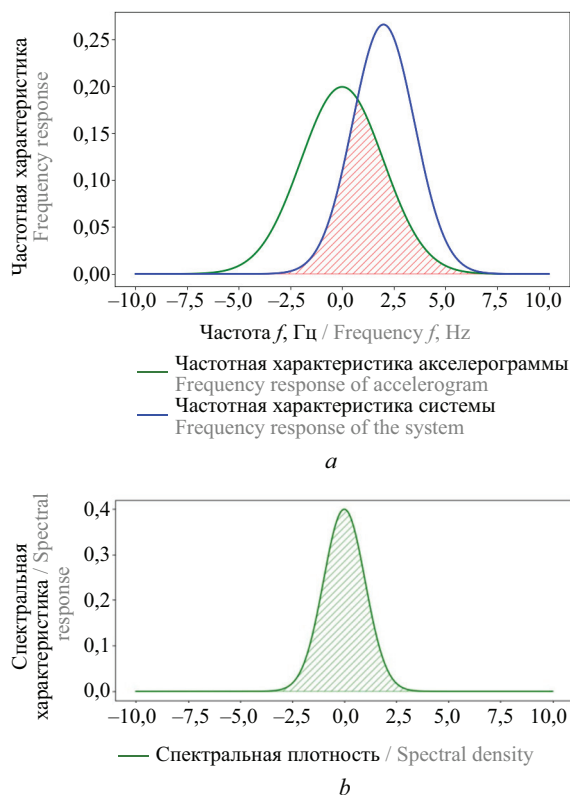


Рис. 3. Схема передачи энергии воздействия системе (а); дисперсия реакции системы (b)

Fig. 3. Scheme of transfer of impact energy to the system (a); dispersion of the reaction of the system (b)

Дифференциальное уравнение движения системы с ограниченным числом степеней свободы, представленное в матричной форме, имеет следующий вид [17]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f^a.$$

При проведении расчета применялась явная схема интегрирования [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено исследование монолитных железобетонных зданий различной этажности с сейсмоизолирующим скользящим поясом в уровне фундамента при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений. Ниже приведены полученные с помощью используемой методики (которая была рассмотрена выше) наиболее неблагоприятные расчетные акселерограммы землетрясения для 9-этажного здания (рис. 4, 5).

Исходные данные исследуемых монолитных железобетонных зданий приведены в работе [16].

Расчет выполнен с помощью прямого динамического метода в многоцелевой программе конечно-элементного анализа LS-DYNA с учетом нелинейного характера деформирования несущих конструкций. При моделировании расчетной схемы использовались стержневые элементы и пространственные конечные элементы оболочки.

Далее в таблице приведены основные результаты расчета.

На основе полученных результатов были построены графики горизонтальных перемещений верхней точки здания относительно нижней (рис. 6), интенсивности напряжений в наиболее нагруженном элементе первого этажа здания (рис. 7), а также получены соответствующие изополя перемещений (рис. 8), интенсивности напряжений для здания в целом (рис. 9) и отдельно для наиболее нагруженного этажа (рис. 10).

Результаты проведенных исследований показывают, что для:

- 3-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса наблюдается снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 4,8 раз, всего здания в 5,5 раз (воздействие по оси X); относительного сдвига 1-го этажа в 7,5 раз, всего здания в 7,3 раз (воздействие по оси Y);
- 5-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса отмечается снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 5,2 раз, всего здания в 4,6 раз (воздействие по оси X); относительного сдвига 1-го этажа в 6,8 раз, всего здания в 6,4 раз (воздействие по оси Y);
- 9-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса фиксируется снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 7,0 раз, всего здания в 5,2 раз (воздействие по оси X); относительного

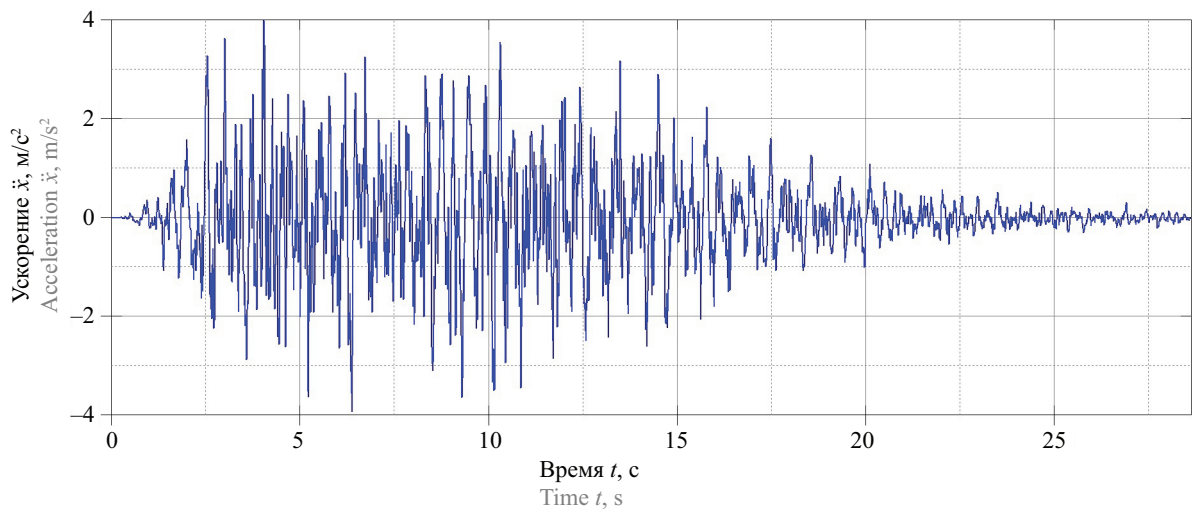


Рис. 4. Наиболее неблагоприятная акселерограмма землетрясения по оси X для 9-этажного здания

Fig. 4. The most unfavourable earthquake accelerogram along the X axis for a 9-story building

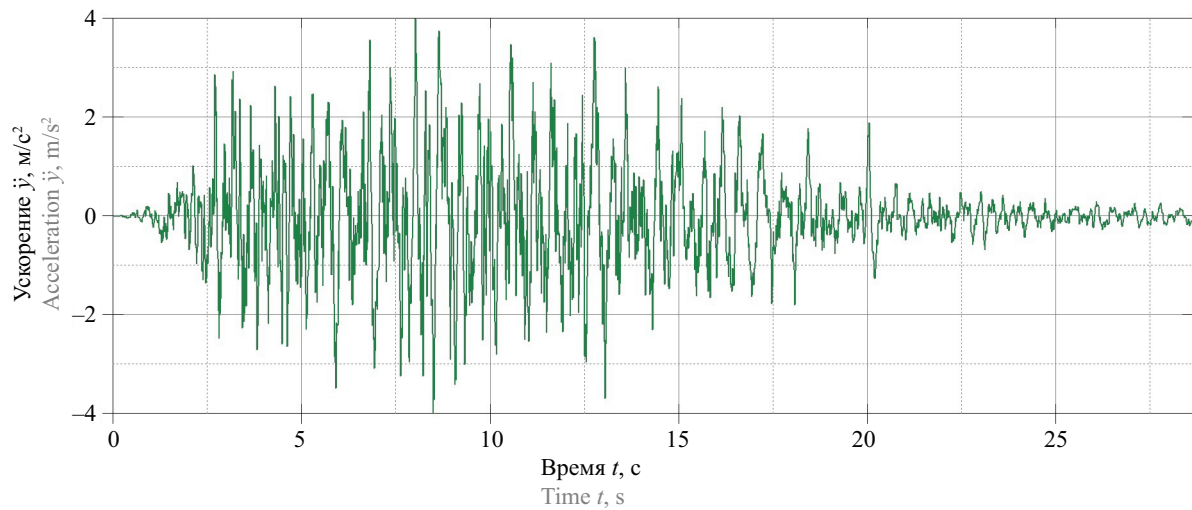


Рис. 5. Наиболее неблагоприятная акселерограмма землетрясения по оси Y для 9-этажного здания

Fig. 5. The most unfavourable earthquake accelerogram along the Y axis for a 9-story building

Основные результаты расчета монолитных железобетонных зданий различной этажности с сейсмоизолирующим скользящим поясом при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения

Main results of the calculation of a monolithic reinforced concrete building of various storeys with a seismic isolating sliding belt under the action of the most unfavourable earthquake accelerograms

Без/с сейсмоизоляцией Without/with seismic isolation	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ всего здания, м Maximum value of the relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the entire building, m	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ 1-го этажа, м Maximum value of relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the 1st floor, m	Интенсивность напряжения в наиболее нагруженном элементе стены 1-го этажа S_{max} , Па·10 ⁷ Stress intensity in the most loaded element of the wall of the 1st floor S_{max} , Pa·10 ⁷
3-этажное здание (сейсмика по оси X) 3-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,00425	0,001	1,28
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,00077	0,00021	0,491

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Без/с сейсмоизоляцией Without/with seismic isolation	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ всего здания, м Maximum value of the relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the entire building, m	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ 1-го этажа, м Maximum value of relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the 1st floor, m	Интенсивность напряжения в наиболее нагруженном элементе стены 1-го этажа S_{max} , Па·10 ⁷ Stress intensity in the most loaded element of the wall of the 1st floor S_{max} , Pa·10 ⁷
3-этажное здание (сейсмика по оси X) 3-storey building (seismic action on the X axis)			
Отношение Relation	5,519	4,762	2,607
3-этажное здание (сейсмика по оси Y) 3-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0109	0,00411	2,34
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,00149	0,000549	0,309
Отношение Relation	7,315	7,486	7,573
5-этажное здание (сейсмика по оси X) 5-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0129	0,0023	2,034
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,0028	0,000445	0,439
Отношение Relation	4,607	5,168	4,633
5-этажное здание (сейсмика по оси Y) 5-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,025	0,0055	3,63
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,00391	0,000811	0,472
Отношение Relation	6,394	6,782	7,691
9-этажное здание (сейсмика по оси X) 9-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0594	0,0046	5,98
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,0114	0,000657	1,43
Отношение Relation	5,211	7,002	4,182
9-этажное здание (сейсмика по оси Y) 9-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0776	0,00786	5,54
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,0132	0,00155	1,31
Отношение Relation	5,878	5,071	4,229

Без/с сейсмоизоляцией Without/with seismic isolation	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ всего здания, м Maximum value of the relative displacement $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ of the entire building, m	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ 1-го этажа, м Maximum value of relative displacement $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ of the 1st floor, m	Интенсивность напряжения в наиболее нагруженном элементе стены 1-го этажа $S_{\max}$, Па·10 ⁷ Stress intensity in the most loaded element of the wall of the 1st floor $S_{\max}$, Pa·10 ⁷
16-этажное здание (сейсмика по оси X) 16-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,220	0,007	9,41
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,051	0,001	2,51
Отношение Relation	4,314	7,000	3,749
16-этажное здание (сейсмика по оси Y) 16-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,445	0,018	16,1
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,055	0,002	2,39
Отношение Relation	8,091	9,000	6,736

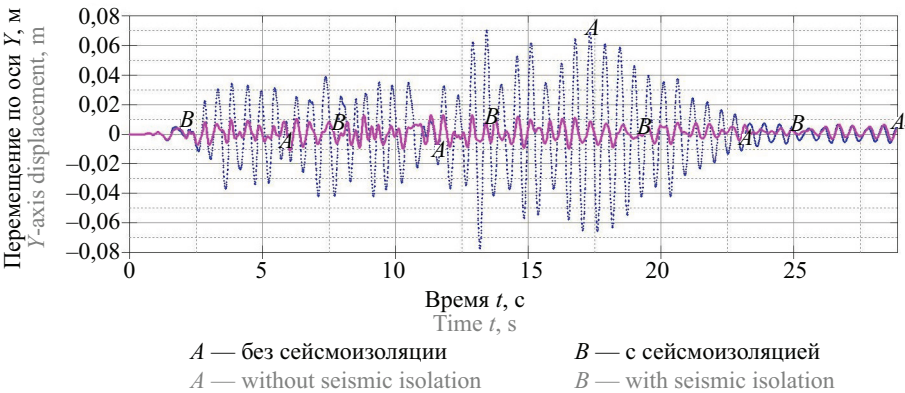


Рис. 6. Перемещение верхней точки 9-этажного здания относительно нижней точки по оси Y с сейсмоизолирующим скользящим поясом и без него, м
Fig. 6. Displacement of the upper point of a 9-storey building relative to the lower point in the Y axis with and without a seismic isolation sliding belt, m

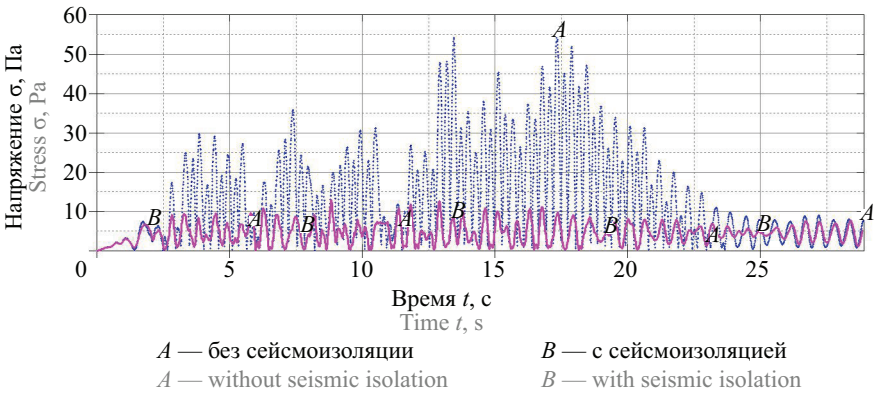


Рис. 7. Интенсивность напряжений в наиболее нагруженном элементе стены 1-го яруса 9-этажного здания с сейсмоизолирующим скользящим поясом и без него, Па
Fig. 7. Stress intensity in the most loaded wall element of the 1st tier of a 9-storey building with and without a seismic isolation sliding belt, Pa

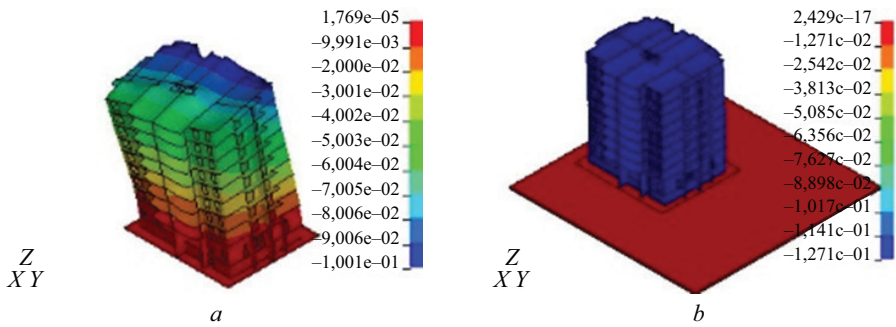


Рис. 8. Изополя перемещений по оси Y в момент времени $t = 13,45$ с 9-этажного здания: a — без сейсмоизоляции; b — с сейсмоизоляцией, м

Fig. 8. Displacement isopoles along the Y axis at the time $t = 13.45$ s of a 9-story building: a — without seismic isolation sliding belt; b — with seismic-isolating sliding belt, m

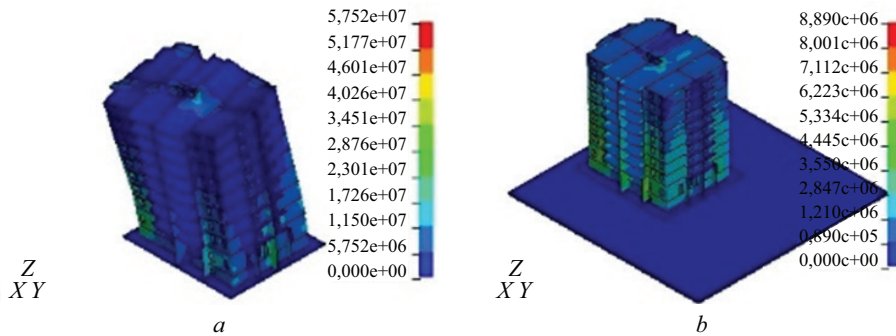


Рис. 9. Изополя интенсивности напряжений в момент времени $t = 13,45$ с 9-этажного здания: a — без сейсмоизолирующего скользящего пояса; b — с сейсмоизолирующим скользящим поясом, Па

Fig. 9. Stress intensity isopoles at the time $t = 13.45$ s of a 9-storey building: a — without seismic isolation sliding belt; b — with seismic isolating sliding belt, Pa

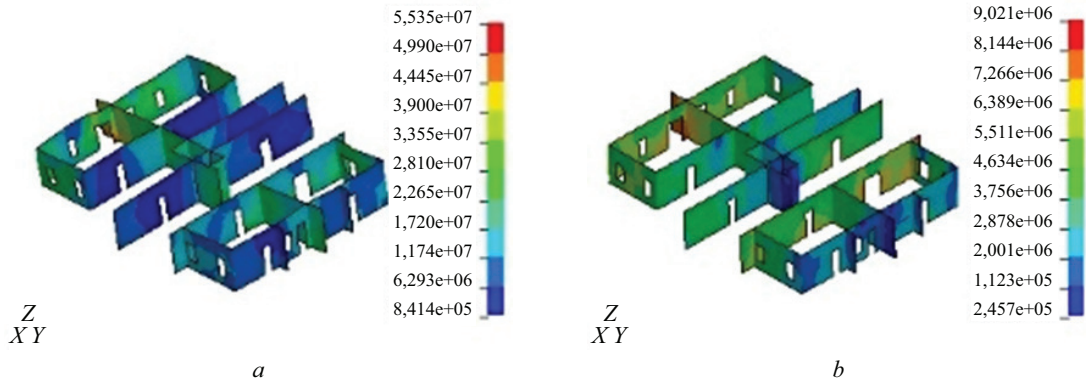


Рис. 10. Изополя интенсивности напряжений в момент времени $t = 17,34$ с 1-го яруса 9-этажного здания: a — без сейсмоизолирующего скользящего пояса; b — с сейсмоизолирующим скользящим поясом, Па

Fig. 10. Stress intensity isopoles at the time $t = 17.34$ s of the 1st tier of a 9-storey building: a — without seismic isolation sliding belt; b — with seismic isolating sliding belt, Pa

сдвига 1-го этажа в 5,1 раз, всего здания в 5,9 раз (воздействие по оси Y);

- 16-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса отмечается снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 7,0 раз, всего здания в 4,3 раз (воздействие по оси X); относительного сдвига 1-го этажа в 9,0 раз, всего здания в 8,1 раз (воздействие по оси Y).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обеспечение сейсмостойкости современных зданий и сооружений представляет собой важную и сложную задачу. Основываясь на характеристиках сейсмического воздействия на конкретном участке строительства, а также на выборе конструктивных решений и учете эксплуатационных требова-

ний, можно определить наиболее подходящий тип сейсмоизоляции. При выборе сейсмоизоляции необходимо учитывать сложность и трудоемкость изготовления, ее стоимость. Сейсмоизоляция должна обеспечивать комплексную защиту от вероятных сейсмических воздействий. В данной работе представлены результаты исследований эффективности сейсмоизолирующего скользящего пояса в уровне фундамента с фторопластовыми пластинами.

Научной новизной является разработка адекватной математической модели здания с сейсмоизолирующим скользящим поясом при действии землетрясения. Полученные результаты позволяют качественно и количественно оценить и расчетным образом обосновать эффективность применения скользящего пояса для использования в сейсмостойком строительстве.

Проведены исследования работы монолитных железобетонных зданий различной этажности

с сейсмоизоляцией и без нее при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения. Анализ результатов исследований свидетельствует о высокой эффективности сейсмозащиты в виде скользящего пояса в уровне фундамента. Данный вид сейсмоизоляции позволяет существенно снизить сейсмические нагрузки на надземную часть конструкций зданий, повысить надежность их работы при землетрясениях, снизить материалоемкость и стоимость строительства. В сравнении с популярными резинометаллическими и маятниковыми скользящими опорами, сейсмоизоляция в виде скользящего пояса в уровне фундамента не требует заводского изготовления и может быть выполнена непосредственно на строительной площадке. Предложенный метод обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений представляет собой практически приемлемый подход, который не требует значительных затрат на антисейсмические мероприятия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Арутюнян Л.М. Оценка надежности железобетонных зданий с сейсмоизолирующим фундаментом с маятниковыми скользящими опорами : дис. ... канд. тех. наук. М., 2017. 141 с. EDN FHKTSY.
2. Dushimimana A., Dushimimana C., Mbereyaho L., Niyonsenga A.A. Effects of building height and seismic load on the optimal performance of base isolation system // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. Issue 10. Pp. 13283–13302. DOI: 10.1007/s13369-023-07660-9
3. Уздин А.М., Мозжухин А.С., Сорокина Г.В. Некоторые вопросы нелинейной работы сейсмоизоляции // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 3. С. 8–19. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-3-8-19. EDN DIOWWZ.
4. Patil A.Y., Patil R.D. A review on seismic analysis of a multi-storied steel building provided with different types of damper and base isolation // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2024. Vol. 25. Issue 4. Pp. 3277–3283. DOI: 10.1007/s42107-023-00978-7
5. Sezer Y.M., Diambra A., Ge B., Dietz M., Alexander N.A., Sextos A.G. Experimental determination of friction at the interface of a sand-based, seismically isolated foundation // *Acta Mechanica*. 2023. Vol. 235. Issue 3. Pp. 1649–1667. DOI: 10.1007/s00707-023-03802-0
6. Asaad R., Kaadan A. Retrofitting existing masonry structures by using seismic base isolation system // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 49. Issue 4. Pp. 5243–5254. DOI: 10.1007/s13369-023-08381-9
7. Calvi P.M., Ruggiero D.M. Numerical modelling of variable friction sliding base isolators // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 14. Issue 2. Pp. 549–568. DOI: 10.1007/s10518-015-9834-y
8. Khoshnudian F., Motamedi D. Seismic response of asymmetric steel isolated structures considering vertical component of earthquakes // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 17. Issue 6. Pp. 1333–1347. DOI: 10.1007/s12205-013-0115-5
9. Уздин А.М., Сандович Т.А., Самих Амин Аль-Насер-Мохомад. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб. : Издательство ВНИИГ, 1993. 175 с.
10. Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М. : Стройиздат, 1989. 318 с.
11. Айзенберг Я.М. Простейшая сейсмоизоляция. Колонны нижних этажей как элемент сейсмоизоляции здания // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2004. № 1. С. 28–32. EDN HXDEUA.
12. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М. : Стройиздат, 1976. 232 с.
13. Мкртычев О.В., Арутюнян Л.М. Исследование работы сейсмоизолирующей маятниковой скользящей опоры при периодическом воздействии // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2016. № 4. С. 38–43. EDN WHCVJD.
14. Мкртычев О.В., Бунов А.А. Сравнительный анализ работы сейсмоизоляции зданий в виде резинометаллических опор на двухкомпонентную акселерограмму // *Наука и образование в современной конкурентной среде : мат. Междунар. науч.-практ. конф.* 2014. С. 117–123.

15. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Сейсмические нагрузки при расчете зданий и сооружений : монография. М. : Изд-во АСВ, 2017. 140 с.
16. Mkrtychev O., Mingazova S. Analysis of the reaction of reinforced concrete buildings with a varying number of stories with a seismic isolation sliding belt to an earthquake // IOP Conference Series : materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052065. DOI: 10.1088/1757-899x/869/5/052065
17. Mkrtychev O., Mingazova S. Numerical analysis of antiseismic sliding belt performance // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. Vol. 19. Issue 2. Pp. 161–171. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-161-171
18. Абрамов Б.М., Абрамов А.Б. Динамический гаситель колебаний, вызываемых периодическими ударами // Механика машин. 1969. № 20. С. 103–117.
19. Алексеев А.М. О демпфировании колебаний импульсно-динамическим гасителем // Проблемы прочности. 1972. № 2. С. 52–54.
20. Васюнкин А.Н., Бобров Ф.В. Экспериментальные исследования зданий на опорах в форме эллипсоидов вращения // Сейсмостойкое строительство. 1976. Т. 14. № 4. С. 20–24.
21. Савинов О.А., Сандович Т.А. О некоторых особенностях применения системы сейсмоизоляции зданий и сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1978. Т. 212. С. 26–39.
22. Черепинский Ю.Д. К сейсмостойкости зданий на кинематических опорах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1972. № 3. С. 13–15.
23. Чуднецов В.П., Солдатова Л.Л. Здания с сейсмоизоляционным скользящим поясом и упругими ограничителями перемещений // Сейсмостойкое строительство. 1979. Т. 14. № 5. С. 1–3.
24. Кузнецов В.Д., Чэнь С. Скользящий пояс с фторопластом сейсмостойкого здания // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 53–58. EDN NTLXRV.
25. Nishia T., Murotab N. Elastomeric seismic-protection isolators for buildings and bridges // Chinese Journal of Polymer Science. 2013. Vol. 31. Issue 1. Pp. 50–57. DOI: 10.1007/s10118-013-1217-8
26. Pan P., Ye L., Shi W., Cao H. Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China // Science China Technological Sciences. 2012. Vol. 55. Issue 11. Pp. 3036–3046. DOI: 10.1007/s11431-012-4922-6
27. Zhou F., Tan P. Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2018. Vol. 17. Issue 1. Pp. 19–27. DOI: 10.1007/s11803-018-0422-4
28. Leblouba M. Selection of seismic isolation system parameters for the near-optimal design of structures // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-022-19114-7
29. Mirzaev I., Yuvmitov A., Turdiev M., Shomurodov J. Influence of the vertical earthquake component on the shear vibration of buildings on sliding foundations // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 264. P. 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202126402022
30. Ahmad N., Shakeel H., Masoudi M. Design and development of low-cost HDRBs seismic isolation of structures // Bulletin of Earthquake Engineering. 2020. Vol. 18. Issue 3. Pp. 1107–1138. DOI: 10.1007/s10518-019-00742-w
31. Ras A., Hamdaoui K. Effect of friction pendulum bearing on metallic buildings behaviour subjected to horizontal ground motions // Asian Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 24. Issue 7. Pp. 2065–2075. DOI: 10.1007/s42107-023-00626-0
32. Hassan W.M. Assessment of ASCE 7–16 seismic isolation bearing torsional displacement // International Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 18. Issue 3. Pp. 351–366. DOI: 10.1007/s40999-019-00462-x
33. Xu W., Du D., Wang S., Liu W., Li W. Shaking table tests on the multi-dimensional seismic response of long-span grid structure with base-isolation // Engineering Structures. 2019. Vol. 201. P. 109802. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109802

Поступила в редакцию 23 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 5 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Олег Вартанович Мкртычев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; MkrtychevOV@mgsu.ru;

Салима Рафиловна Мингазова — аспирантка кафедры сопротивления материалов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7506-5852, Scopus: 57207860320; salima.mingazova@yandex.ru.

Вклад авторов:

Мкртычев О.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Мингазова С.Р. — проведение численных исследований, подготовка исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Arutyunyan L.M. *Assessment of reinforced concrete buildings with seismic insulating foundations by pendulum sliding supports : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2017; 141. EDN FHKTSY. (rus.).
2. Dushimimana A., Dushimimana C., Mberayaho L., Niyonsenga A.A. Effects of building height and seismic load on the optimal performance of base isolation system. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023; 48(10):13283-13302. DOI: 10.1007/s13369-023-07660-9
3. Uzdin A.M., Mozzhuhin A.S., Sorokina G.V. Some questions of nonlinear seismic isolation behavior. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2022; 3:8-19. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-3-8-19. EDN DIOUWZ. (rus.).
4. Patil A.Y., Patil R.D. A review on seismic analysis of a multi-storied steel building provided with different types of damper and base isolation. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2024; 25(4):3277-3283. DOI: 10.1007/s42107-023-00978-7
5. Sezer Y.M., Diambra A., Ge B., Dietz M., Alexander N.A., Sextos A.G. Experimental determination of friction at the interface of a sand-based, seismically isolated foundation. *Acta Mechanica*. 2023; 235(3):1649-1667. DOI: 10.1007/s00707-023-03802-0
6. Asaad R., Kaadan A. Retrofitting existing masonry structures by using seismic base isolation system. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023; 49(4):5243-5254. DOI: 10.1007/s13369-023-08381-9
7. Calvi P.M., Ruggiero D.M. Numerical modelling of variable friction sliding base isolators. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2015; 14(2):549-568. DOI: 10.1007/s10518-015-9834-y
8. Khoshnudian F., Motamedi D. Seismic response of asymmetric steel isolated structures considering vertical component of earthquakes. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013; 17(6):1333-1347. DOI: 10.1007/s12205-013-0115-5
9. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Samikh Amin Al-Naser-Mohomad. *Fundamentals of the theory of earthquake engineering of buildings and structures*. St. Petersburg, VNIH Publishing House, 1993; 175. (rus.).
10. Polyakov V.S., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. *Modern Methods of Seismic Protection of Buildings*. Moscow, Stroyizdat, 1989; 318. (rus.).
11. Eisenberg Y.M. Simple seismic protection. lower floor columns as an element of building seismic protection. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2004; 1:28-32. EDN HXDEUA. (rus.).
12. Eisenberg Y.M. *Structures with switching links for seismic areas*. Moscow, Stroyizdat, 1976; 232. (rus.).
13. Mkrtychev O.V., Arutyunyan L.M. Research of work of seismic isolation friction pendulum bearing at periodic influence. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2016; 4:38-43. EDN WHCVJD. (rus.).
14. Mkrtychev O.V., Bunov A.A. Comparative analysis of the work of seismic insulation of buildings in the form of rubber-metal supports on a two-component accelerogram. *Science and education in a modern competitive environment: materials of the international scientific-practical conference*. 2014; 117-123. (rus.).
15. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. *Seismic loads in the calculation of buildings and structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2017; 140. (rus.).
16. Mkrtychev O., Mingazova S. Analysis of the reaction of reinforced concrete buildings with a varying number of stories with a seismic isolation sliding belt to an earthquake. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052065. DOI: 10.1088/1757-899x/869/5/052065
17. Mkrtychev O., Mingazova S. Numerical analysis of antiseismic sliding belt performance. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023; 19(2):161-171. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-161-171
18. Abramov B.M., Abramov A.B. Dynamic damper of vibrations caused by periodic shocks. *Mechanics of Machines*. 1969; 20:103-117. (rus.).
19. Alekseev A.M. About the damping of vibrations by impulse-dynamic damper. *Problems of Strength*. 1972; 2:52-54. (rus.).
20. Vasyunkin A.N., Bobrov F.V. Experimental investigations of buildings on supports in the form of ellipsoids of rotation. *Earthquake Engineering*. 1976; 14(4):20-24. (rus.).
21. Savinov O.A., Sandovich T.A. About some peculiarities of applying the system of seismic insulation of buildings and structures. *Vedeneev VNIIG*. 1978; 212:26-39. (rus.).
22. Cherepinsky Y.D. To seismic stability of buildings on kinematic supports. *Foundations, Fundamentals and Soil Mechanics*. 1972; 3:13-15. (rus.).
23. Chudnetsov V.P., Soldatova L.L. Buildings with seismic insulating sliding belt and elastic limiters of displacements. *Earthquake Engineering*. 1979; 14(5):1-3. (rus.).
24. Kuznetsov V.D., Chen S. Sliding belt with fluoroplastic of earthquake-resistant building. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 3:53-58. EDN NTLXRV. (rus.).
25. Nishia T., Murotab N. Elastomeric seismic-protection isolators for buildings and bridges. *Chinese Journal of Polymer Science*. 2013; 31(1):50-57. DOI: 10.1007/s10118-013-1217-8
26. Pan P., Ye L., Shi W., Cao H. Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China. *Science China Technological Sciences*. 2012; 55(11):3036-3046. DOI: 10.1007/s11431-012-4922-6

27. Zhou F., Tan P. Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2018; 17(1):19-27. DOI: 10.1007/s11803-018-0422-4
28. Leblouba M. Selection of seismic isolation system parameters for the near-optimal design of structures. *Scientific Reports*. 2022; 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-19114-7
29. Mirzaev I., Yuvmitov A., Turdiev M., Shomurov J. Influence of the vertical earthquake component on the shear vibration of buildings on sliding foundations. *E3S Web of Conferences*. 2021; 264:02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202126402022
30. Ahmad N., Shakeel H., Masoudi M. Design and development of low-cost HDRBs seismic isolation of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020; 18(3):1107-1138. DOI: 10.1007/s10518-019-00742-w
31. Ras A., Hamdaoui K. Effect of friction pendulum bearing on metallic buildings behaviour subjected to horizontal ground motions. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023; 24(7):2065-2075. DOI: 10.1007/s42107-023-00626-0
32. Hassan W.M. Assessment of ASCE 7–16 seismic isolation bearing torsional displacement. *International Journal of Civil Engineering*. 2020; 18(3):351-366. DOI: 10.1007/s40999-019-00462-x
33. Xu W., Du D., Wang S., Liu W., Li W. Shaking table tests on the multi-dimensional seismic response of long-span grid structure with base-isolation. *Engineering Structures*. 2019; 201:109802. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109802

Received January 23, 2024.

Adopted in revised form on March 11, 2024.

Approved for publication on April 5, 2024.

B I O N O T E S: **Oleg V. Mkrtychev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; MkrtychevOV@mgsu.ru;

Salima R. Mingazova — postgraduate student of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7506-5852, Scopus: 57207860320; salima.mingazova@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Oleg V. Mkrtychev — scientific guidance, research concept, development of methodology, final conclusions.

Salima R. Mingazova — numerical research, preparation of the original text, final conclusions.

The authors declare the absence of conflict of interest.

Наномодифицированная цементная композиция

Дмитрий Александрович Ляшенко, Владимир Александрович Перфилов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Приоритетным направлением строительного материаловедения является получение материалов, имеющих повышенные эксплуатационные характеристики. Самый распространенный строительный материал — бетон различного функционального назначения. Развитие строительного комплекса приводит к проектированию все более сложных конструкций, возведение которых требует высокоэффективных бетонов с повышенной эксплуатационной надежностью.

Материалы и методы. Приведены литературные данные по применению различных наномодифицирующих добавок в бетон. Предлагается в качестве комплексной добавки для бетона совместное применение углеродных нанотрубок (УНТ) и пластификатора СП-3, а также введение наномодифицирующей добавки методом ультразвукового диспергирования.

Результаты. Представлены результаты серии испытаний, направленных на изучение влияния комплексной добавки на прочностные характеристики мелкозернистого бетона. Определено повышение прочности при сжатии бетона, модифицированного УНТ. С помощью электронной микроскопии установлено, что использование наноматериалов изменяет структуру бетона на микро- и наноуровне.

Выводы. Исследования при помощи электронного микроскопа показывают наличие модифицированных участков мелкозернистого бетона углеродными нанотрубками. Однако наномодифицирующая добавка распределена не по всему объему смеси, в связи с этим следует учесть дополнительные мероприятия по распределению компонентов смеси. Применение смесителей различного типа может положительно сказаться на диспергировании УНТ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наномодифицированный бетон, ультразвуковое диспергирование, углеродные нанотрубки, пластификатор, прочность при сжатии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ляшенко Д.А., Перфилов В.А. Наномодифицированная цементная композиция // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1116–1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Александрович Ляшенко, dmitiry.lyashenko@yandex.ru.

Nanomodified cement composition

Dmitry A. Lyashenko, Vladimir A. Perfilov

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The focus area of construction materials science is to create materials with better performance characteristics. The most common construction material is concrete that has various purposes. The development of the construction industry leads to the design of increasingly complex structures, whose construction requires high-performance concretes featuring greater reliability.

Materials and methods. Reported research data on using various nano-modifying additives for concrete are presented. Co-using carbon nanotubes (CNT) and plasticizer SP-3, as well as adding the nano-modifying additive by the method of ultrasonic dispersion are proposed as a composite additive for concrete.

Results. The results of a series of tests are presented. The tests were aimed at studying the effect of a composite additive on the strength characteristics of fine-grained concrete. An increase in the compressive strength of concrete modified with CNTs was detected. Electron microscopy was employed to find that the use of nanomaterials changes the structure of concrete at micro- and nano-scale levels.

Conclusions. Electron microscopy studies show the presence of fine-grained concrete areas modified with carbon nanotubes. However, this nano-modifying additive does not spread throughout the entire mixture. Therefore, additional actions should be considered to make the components spread throughout the mixture. The use of different type of mixers can have a positive effect on the dispersion of CNTs.

KEYWORDS: nanomodified concrete, ultrasonic dispersion, carbon nanotubes, plasticizer, compressive strength

FOR CITATION: Lyashenko D.A., Perfilov V.A. Nanomodified cement composition. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1116-1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124 (rus.).

Corresponding author: Dmitry A. Lyashenko, dmitiry.lyashenko@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в мире исследуются технологии, направленные на изучение малых молекул атомов. В развитых экономически странах приоритетным направлением является применение нанотехнологий. Актуальность исследований по внедрению нанотехнологий в строительное материаловедение обусловлена «дорожной картой» строительства, которая утверждена учеными всего мира [1] в период до 2025 г. Несмотря на это, область применения нанотехнологий в строительном комплексе еще находится на ранней стадии развития.

Основной строительный материал в мире — бетон и железобетон. В связи с этим в производство бетонных изделий активно внедряются технологии нового поколения. Они заключаются в использовании комплексных модифицирующих добавок различного функционального назначения.

Свойства бетона напрямую определяются его структурой. Раньше в работах рассматривались размеры структуры на макро-, мезо- и микроуровне. В настоящее время все чаще рассматривается наноструктура бетона [2, 3]. Одним из основных материалов наномодификации бетона можно считать углерод.

Углеродные нанотрубки (УНТ), понимаемые как набор углеродных структур, которые после синтеза приобретают цилиндрическую форму в нанометровом масштабе, классифицируются как одностенные и многостенные УНТ в зависимости от сформированных цилиндров [4]. Модуль упругости углерода примерно в шесть раз выше, чем у стали, а предел прочности при растяжении на два порядка выше и может достигать примерно 150 ГПа [5]. Благодаря этому можно считать, что УНТ служат идеальным кандидатом для применения в композиционных материалах. Можно считать такую добавку регулятором распространения микротрещин [6]. Нанотрубки в структуре бетона выступают в роли дополнительных центров кристаллизации, их наличие изменяет направление и регулирует скорость физико-химических процессов при твердении бетона, благодаря этому снижается внутреннее напряжение. Таким образом, введение наномодификаторов положительно влияет на процессы структурообразования матрицы, благодаря чему обеспечивается повышение плотности мелкозернистых кристаллогидратных фаз вблизи нанотрубок. Как следствие, механическая прочность бетона повышается [7, 8].

Несмотря на то, что УНТ обладают высокими характеристиками, при введении в цементные композиционные материалы они не всегда гарантируют повышение эксплуатационных характеристик по двум основным ограничениям.

Трудность диспергирования наномодифицирующих добавок состоит, главным образом, в их гидрофобной природе и сильных ван-дер-ваальсовых

силах между ними [9]; слабом межфазном взаимодействии между УНТ и матрицей [10]. Помимо этого, имеется множество работ, направленных на изучение введения наноразмерных добавок путем технологии ультразвукового диспергирования [11, 12].

Основная цель данного исследования — подбор состава и создание мелкозернистого бетона с повышенной прочностью, устойчивого к трещинообразованию путем применения комплексной добавки, включающей УНТ и суперпластификатор.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксплуатационные характеристики бетона в значительной степени зависят от следующих факторов: структура материала на микроскопическом уровне, характер сопротивления деформациям, явления теплообмена, а также интенсивность капиллярной проницаемости [13, 14].

Как показывает множество работ, уменьшение размеров частиц материала значительно повышает его характеристики [15]. К примеру, удельная поверхность частиц портландцементного вяжущего составляет приблизительно 3000 см²/г. Благодаря такой удельной поверхности в химическую реакцию вступает примерно четверть объема цементного вяжущего. Для достижения полной гидратации цемента применяется измельчение материалов до максимально возможных малых размеров. Для этого используются так называемые методы активации.

При активации у цементных вяжущих наблюдается повышение степени реакционной способности, помимо уменьшения размеров зерен цемента этот эффект обуславливается повышением концентрации дефектов и образованием новых активных поверхностных центров, что является причиной изменения кристаллической структуры [16, 17]. Применение механоактивации цементов приводит к изменению сорбционных свойств твердых поверхностей благодаря образованию в ней активных центров, которые имеют радикальную природу. Главный недостаток данной технологии — энергозатратность процесса активации. Механическая активация твердых веществ требует передачи большого количества энергии, направленной на деформацию кристаллической решетки материала. В связи с этим установки для механоактивации имеют высокую энергонапряженность. Ударное воздействие служит одним из наиболее эффективных способов передачи энергии для технологии механоактивации, так как такой способ позволяет направить энергию в определенные участки обрабатываемого материала. Для механической активации вяжущих применяются различного вида мельницы [18, 19]. В таких установках рабочим элементом являются мелющие тела, которые могут представлять собой шары, цилиндры или отрезки, изготовленные из твердого, плотного материала. Механизм помола может быть основан на приведении в движение мелющих тел

за счет электродвигателя и сил тяжести, а также за счет магнитного поля.

Однако применение технологии домолла цементного вяжущего — финансово затратно. Поэтому зачастую использование таких методов экономически нецелесообразно для предприятия.

При рассмотрении свойств бетона на уровне частиц от 50 до 100 мкм наблюдается изменение в дисперсной системе (цемент — наполнитель) признаков коллоида в водной среде, также на этом уровне отмечается прекращение броуновского движения частиц и резкое уменьшение количества свободной поверхностной энергии из-за установленного фазового равновесия системы [20].

Другим направлением микромодификации структуры бетона является введение в состав бетонной смеси наномодифицирующих добавок различного типа. Одна из наиболее известных наномодифицирующих добавок — микрокремнезем, получаемый в качестве побочного продукта при производстве металлического кремния и ферросилиция. Коллоидные частицы микрокремнезема имеют размер 10^{-5} – 10^3 м. Нанобетоном называется строительный материал, который включает в своем составе наноразмерные добавки. Известно, что введение в состав бетона незначительного количества наномодифицирующих добавок (частиц с размерами от 1–100 нм) позволяет приобретать новые свойства. Это связано с модифицированием структуры получаемого композиционного материала на наноразрыве.

Наноразмерные частицы присутствуют в хризолитовом асбесте в виде нанотрубок. Возможно, наличие нанотрубок и обеспечивает повышение прочности цементной матрицы при использовании асбеста [21].

Помимо этого, нанотрубки содержатся в серпентините. Из данного минерала изготавливают

ремонтно-восстановительные составы. Особое внимание можно уделить фуллероидам (одно- или многослойные нанотрубки).

В качестве наномодифицирующих компонентов применяются различные материалы как природного, так и искусственного происхождения. Можно выделить следующие добавки: нановолокна различных модификаций, сажа, астралены, УНТ, фуллерены, микрокремнезем, минералы, наноразмерные породы и пр. Выбор наномодифицирующих добавок зависит от требуемых параметров, а также технических и функциональных свойств структуры материала. Наибольшее распространение имеют углеродные наномодифицирующие добавки, золи и фуллерены [22].

В данной работе было принято решение об использовании углеродных нанотрубок. Ключевыми параметрами выступили длина УНТ (3–5 мкм), внешний диаметр (10–60 нм) и внутренний диаметр (10–20 нм). Исходя из рассмотренных литературных данных, такие значения являются наиболее эффективными [23–25].

Для проведения лабораторных испытаний использованы материалы: цемент «Евроцемент Экстра» марки М500, песок, суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ СП-3», углеродные нанотрубки серии Таунит-М от производителя ООО «Нано Тех Центр».

Была приготовлена серия из 11 составов мелкозернистого бетона с применением различной концентрации нанотрубок.

Для введения нанотрубок в состав бетона применялся ультразвуковой диспергатор УЗГ13-01/22 (рис. 1).

Ультразвуковой диспергатор является аппаратом, генерирующим ультразвуковую энергию малой мощности. Он предназначен для возбуждения пьезокерамических преобразователей с целью интенсификации обработки хрупких или твердых ма-

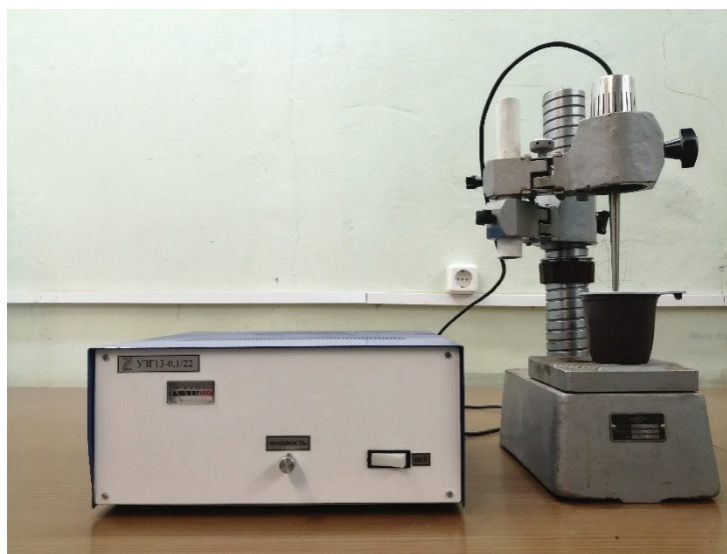


Рис. 1. Ультразвуковой диспергатор УЗГ13-01/22

Fig. 1. Ultrasonic disperser UZG 13-01/22

териалов, шлифования, микросварки, очистки, диспергирования и прочих процессов, требующих наличия ультразвуковых колебаний.

Технология введения нанотрубок имела следующий вид. Исходя из требований по определению оптимального состава бетона выполнены исследования подвижности смеси, согласно которым экспериментально определено значение водоцементного отношения 0,42. В расчетное количество воды вводились УНТ и пластификатор СП-3. Далее в воду погружался рабочий элемент ультразвукового диспергатора и происходила обработка ультразвуком в течение 5 мин. Время обработки также подобрано исходя из заранее проведенных лабораторных исследований. После диспергирования полученную суспензию вводили в заранее подготовленную цементно-песчаную смесь, после чего все компоненты размешивались до получения однородной массы. После этого осуществлялась формовка образцов согласно ГОСТ 30744 с виброуплотнением смеси. На следующий день образцы распалубливались и помещались в емкость с водой для проведения дальнейших исследований. Для каждого образца был установлен предел прочности при сжатии при помощи неразрушающего метода аппаратом Пульсар 1.2 в возрасте 7, 14, 28 сут (рис. 2).

Для изучения структуры получаемого мелкозернистого бетона из полученных образцов-балочек в возрасте 28 сут отобраны пробы для изучения на электронном микроскопе Versa 3D (рис. 3). Для этого производилось измельчение образцов мелкозернистого бетона и просеивание на сите 0,315 мм.

Данный микроскоп имеет кратность до 120 000, что позволяет исследовать структуру материала на наноуровне. Помимо этого, прибор имеет возможность проведения энергодисперсного рентгеновского анализа. Данный метод анализа твердых веществ основан на пропускании пучка электронов через исследуемый материал, атомы которого возбуждаются, испуская характерное для всех химических веществ рентгеновское излучение. Исследуя спектр таких из-



Рис. 2. Ультразвуковой прибор Пульсар 1.2

Fig. 2. Ultrasonic instrument Pulsar 1.2



Рис. 3. Электронный микроскоп Versa 3D

Fig. 3. Electron microscope Versa 3D

лучений, можно выполнить качественный и количественный анализ состава вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведена серия испытаний образцов мелкозернистого бетона различного состава (табл. 1). Для изучения влияния наномодифицирующей добавки в состав бетона вводились УНТ в количестве от 0,001 до 0,01 % по массе вяжущего. Контрольные образцы были приготовлены из состава без включения нанодобавки.

Для всех составов был определен предел прочности при сжатии с помощью неразрушающего метода в возрасте 7, 14 и 28 сут (табл. 2).

Обнаружено, что при минимальном значении вводимых УНТ прочность мелкозернистого бетона повышается на 10,5 %. Максимальный прирост прочности имел состав С-11, с увеличением на 15,8 %. Однако схожие показатели были у состава С-6, прочность которого возросла на 14,4 %. Из-за незначительной разницы значений можно сделать вывод, что введение УНТ в количестве 0,005–0,01 % имеет одинаковый эффект.

Следует отметить, что прирост прочности наблюдается уже на 7 сут. Для состава С-11 он составил 15,5 %. Повышение прочностных характеристик на ранних сроках твердения бетонов положительно влияет на производственные процессы.

На рис. 4 наблюдается положительное изменение характера набора прочности бетона. Об-

Табл. 1. Исследуемые составы

Table 1. Investigated compositions

Состав Composition	Цемент, г Cement, g	Песок, г Sand, g	Вода, г Water, g	СП-3, г Plasticizer SP-3	УНТ, % по массе Ц Carbon nanotubes, mass %
C-1	500	1500	210	3,5	–
C-2	500	1500	210	3,5	0,001
C-3	500	1500	210	3,5	0,002
C-4	500	1500	210	3,5	0,003
C-5	500	1500	210	3,5	0,004
C-6	500	1500	210	3,5	0,005
C-7	500	1500	210	3,5	0,006
C-8	500	1500	210	3,5	0,007
C-9	500	1500	210	3,5	0,008
C-10	500	1500	210	3,5	0,009
C-11	500	1500	210	3,5	0,01

Табл. 2. Прочностные характеристики мелкозернистого бетона

Table 2. Strength characteristics of fine-grained concrete

Состав Composition	$R_{сж}$ 7 сут, МПа R_{comp} 7 days, MPa	$R_{сж}$ 14 сут, МПа R_{comp} 14 days, MPa	$R_{сж}$ 28 сут, МПа R_{comp} 28 days, MPa
C-1	36,4	39	40,8
C-2	39,2	40,9	45,6
C-3	40	40,9	43,7
C-4	39,8	42,6	47,1
C-5	41,2	42,8	45,9
C-6	41,9	43,7	47,7
C-7	41,5	44,6	46,8
C-8	41,8	44	47,7
C-9	41,1	43,5	47,3
C-10	40,9	43,5	47,2
C-11	43,1	44,4	48,5

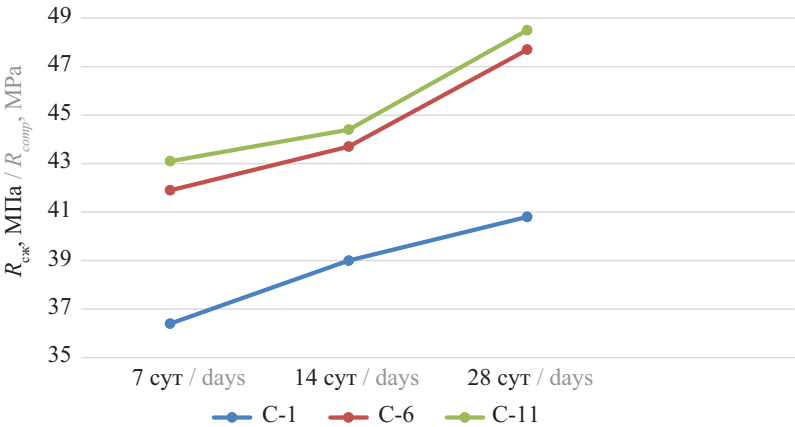


Рис. 4. Характер набора прочности мелкозернистого бетона

Fig. 4. Character of strength gain in fine-grained concrete

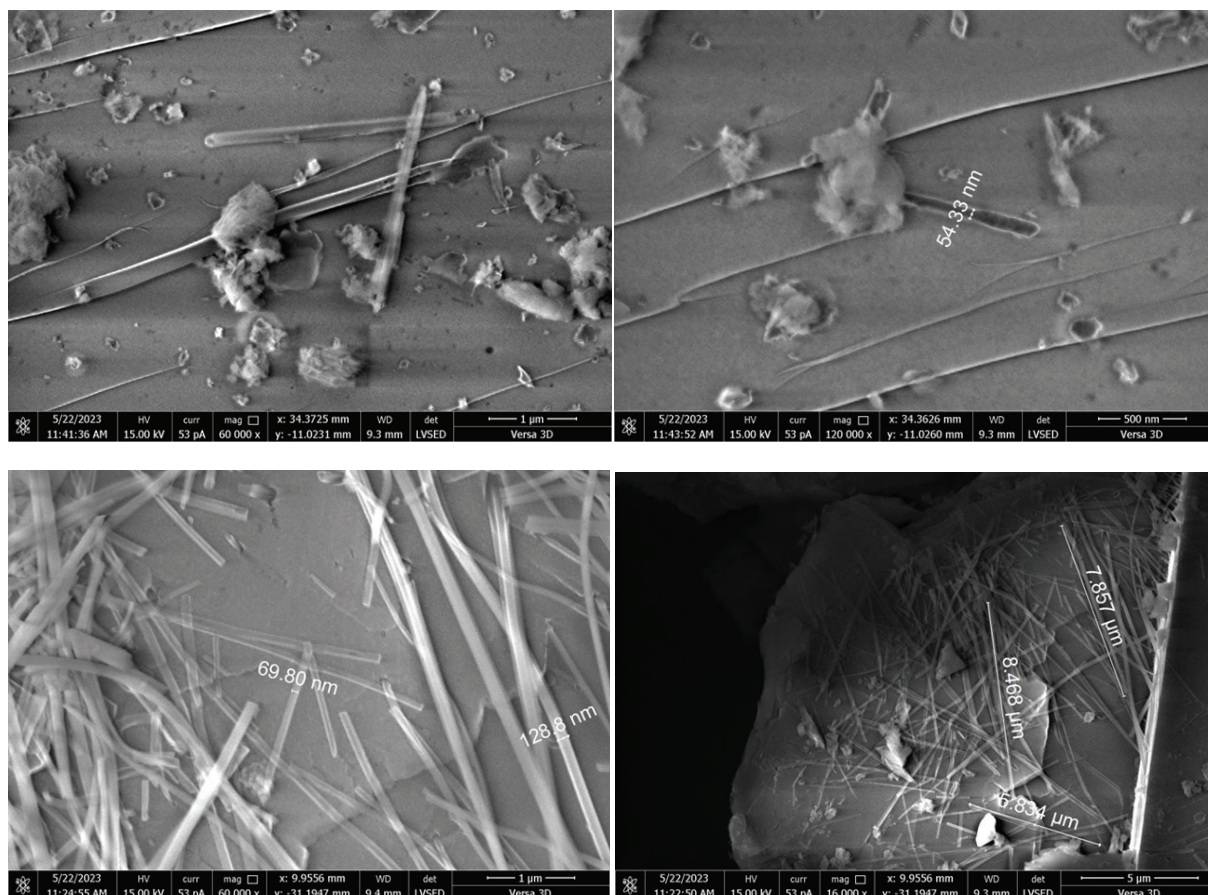


Рис. 5. Микрофотографии наномодифицированного бетона различного увеличения

Fig. 5. Microphotographs of nanomodified concrete at different magnifications

разцы наномодифицированного бетона к 28 сут имели большую интенсивность набора прочности, чем у контрольного состава.

Для понимания принципа механизма влияния УНТ на свойства бетона изучена структура исследуемых образцов (рис. 5).

На представленных микрофотографиях отмечаются включения УНТ. Об этом свидетельствуют показатели размеров игольчатых включений. Нанотрубки в среднем имеют внешний диаметр до 100 нм, в то время как средняя длина составляет 6,5 мкм.

Углеродные нанотрубки, зафиксированные на микрофотографиях, обладают стабильным значением диаметра по всей длине волокон, что обеспечивает оптимальные условия роста новообразований цементного камня. Это связано с тем, что в процессе твердения модифицированного бетона на включениях УНТ происходит образование и срастание кристаллов цементного вяжущего. В то время как ровная поверхность УНТ способствует процессу образования каркасной структуры будущей матрицы.

На нанотрубках присутствуют частицы новообразований, что свидетельствует о модифицировании структуры мелкозернистого бетона.

Структура модифицированного материала имеет плотную компоновку частиц, благодаря чему происходит повышение прочностных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально доказано, что оптимальное количество вводимых УНТ составляет 0,005 % по массе вяжущего вещества. Так как при повышении концентрации наномодифицирующей добавки (свыше 0,005 %) отмечается незначительное увеличение прочности.

Введение малого количества нанодобавки (0,0001–0,001 % по массе вяжущего) производится путем активации воды затворения при помощи ультразвукового диспергирования, способствующего более равномерному распределению нанотрубок по всему объему смеси. В процессе твердения вяжущего на поверхности и внутри нанотрубок образуются кристаллообразные соединения новообразований цементного камня, способствующие пространственному армированию структуры мелкозернистого бетона на наноуровне.

Совместное введение УНТ и пластификатора в состав мелкозернистого бетона позволяет повысить прочность на 15 %. Помимо этого, наблюдается прирост прочности уже на ранних сроках твердения бетонной смеси, а также повышение интенсивно-

сти набора прочности в течение 28 сут. Повышение прочности объясняется дискретным армированием цементной матрицы.

Исследования при помощи электронного микроскопа показывают наличие модифицированных участков мелкозернистого бетона углеродными на-

нотрубками. Однако наномодифицирующая добавка распределена не по всему объему смеси, в связи с этим следует учесть дополнительные мероприятия по распределению компонентов смеси. Применение смесителей различного типа может положительно сказаться на диспергировании УНТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kana-ka Durga S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nano-materials : a critical review // Journal of Nanomaterials. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2023/1004597
2. Паламарчук А.А., Шишакина О.А., Кочуров Д.В., Аракеян А.Г. Полимерные бетоны — перспективные строительные материалы // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 6. С. 105. EDN YRRQLZ.
3. Фахратов М.А., Евдокимов В.О., Бородин А.С. Перспективы применения наноструктурированного бетона в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3 (50). С. 124. EDN MIVHBZ.
4. Енджиевская И.Г., Демина А.В., Енджиевский А.С., Дубровская С.Д. Оценка взаимодействия добавок в бетоне // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 128–137. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-128-137. EDN WWWUVS.
5. Ali Askari K.O., Singh V.P., Dalezios N.R., Crusberg T.C. Polymer concrete // International Journal of Hydrology. 2018. Vol. 2. Issue 5. DOI: 10.15406/ijh.2018.02.00135
6. Моисеева В.И., Пирогова Я.В., Тюменцев М.Е., Паньков П.А. Нанотехнологии в области производства строительных материалов // Инновации и инвестиции. 2019. № 11. С. 293–297. EDN UFODNHQ.
7. Dahlan A.S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete // Journal of Molecular Structure. 2021. Vol. 1223. P. 128896. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.128896
8. Bhatta D.P., Singla S., Garg R. Microstructural and strength parameters of Nano-SiO₂ based cement composites // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 46. Pp. 6743–6747. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.276
9. Пименов А.И., Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Влияние углеродных нанотрубок и способа их введения на свойства цементных композиций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 6 (666). С. 26–30. EDN SXHLNH.
10. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6 (8). С. 25–33. EDN NBMZNP.
11. Самченко С.В., Земскова О.В., Козлова И.В. Стабилизация дисперсий углеродных нанотрубок при ультразвуковой обработке // Техника и технология силикатов. 2014. Т. 21. № 3. С. 14–18. EDN SNAVPH.
12. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Lukyanova N.A. Influence of activation methods on the structural and technological characteristics of nanomodified cement compositions // Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal. 2022. Vol. 14. Issue 6. Pp. 481–492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492
13. Галиновский А.Л., Моисеев В.А., Проваторов А.С., Осипков А.С., Яковлев Г.И. Разработка ультраструйной технологии получения суспензий с углеродными нанотрубками // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 11 (143). С. 37–43. EDN WVKSGP.
14. Моница Т.А., Антонов И.И. Современные материалы и технологии в прототипировании. Нанотехнологии и наноматериалы // Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник РГХПУ им. С.Г. Строганова. 2021. № 2–2. С. 20–28. EDN RPZZMQ.
15. Андреев А.В., Давыдова Н.Н., Буренина О.Н., Петухова Е.С. Улучшение качества мелкозернистого бетона путем механоактивации цемента // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 94. С. 451–460. EDN RUYCNX.
16. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Интенсификация процессов гидратации при механоактивации вяжущего // Фундаментальные основы строительного материаловедения : сб. докл. Междунар. онлайн-конгресса. 2017. С. 806–808. EDN YLPFNJ.
17. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А. Влияние механохимической активации цементной суспензии на физико-технические свойства цементных композиций // Фундаментальные основы строительного материаловедения : сб. докл. Междунар. онлайн-конгресса. 2017. С. 797–805. EDN MCDMRK.
18. Ляшенко Д.А., Перфилов В.А., Весова Л.М. Мелкозернистый наномодифицированный бетон // Инженерный вестник Дона. 2022. № 10 (94). С. 369–378. EDN NKKAXY.
19. Ляшенко Д.А., Перфилов В.А., Лукьяница С.В., Лушиногин В.В. Разработка состава наномодифицированного цемента // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 393–402. EDN AZQKTA.

20. Usherenko S., Figovsky O. Superdeep penetration as the new physical tool for creation of composite materials // *Advanced Materials Research*. 2008. Vol. 47–50. Pp. 395–402. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.395

21. Figovsky O., Shapovalov L. New nonisocyanate polyurethane coatings // *China Coatings Journal (CCJ)*. 2006. Issue 2. Pp. 49–58.

22. Kudryavtsev B., Figovsky O., Egorova E. The use of nanotechnology in production of bioactive paints and coatings // *J. Scientific Israel-Technological Advantages*. 2003. Vol. 15. Pp. 209–215.

23. Строкова В.В., Череватова А.В., Павленко Н.В., Мирошников Е.В., Шаповалов Н.А. Оценка

эффективности применения наноструктурированного вяжущего при получении легковесных ячеистых композитов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2011. № 4. С. 48–51. EDN OXVZTH.

24. Жерновский И.В., Осадчая М.С., Череватова А.В., Строкова В.В. Алюмосиликатное наноструктурированное вяжущее на основе гранитного сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 38–41. EDN QCDQDD.

25. Шестаков Н.И., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Семенов А.П., Смирнягина Н.Н. Асфальтобетон с использованием углеродных наномодификаторов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 6. С. 21–24. EDN ULFTKT.

Поступила в редакцию 8 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 11 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Александрович Ляшенко — аспирант; Институт архитектуры и строительства; Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1054316, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitiry.lyashenko@yandex.ru;

Владимир Александрович Перфилов — доктор технических наук, профессор; Институт архитектуры и строительства; Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0000-0001-9196-7572; vladimirperfilov@mail.ru.

Вклад авторов:

Ляшенко Д.А. — написание исходного текста, итоговые выводы.

Перфилов В.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kanka Durga S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials : a critical review. *Journal of Nanomaterials*. 2023; 2023:1-15. DOI: 10.1155/2023/1004597

2. Palamarchuk A.A., Shishakina O.A., Kochurov D.V., Arakelyan A.G. Polymeric concretes — perspective construction materials. *International Student Scientific Bulletin*. 2018; 6:105. EDN YRRQLZ. (rus.).

3. Fakhratov M.A., Evdokimov V.O., Borodin A.S. Prospects for the use of nanostructured concrete in construction. *Engineering journal of Don*. 2018; 3(50):124. EDN MIVHBZ. (rus.).

4. Endzhievskaya I.G., Demina A.V., Endzhievskii A.S., Dubrovskaya S.D. Evaluation of additive interaction in concrete. *Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24(3):128-137. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-128-137. EDN WWWUVS. (rus.).

5. Ali Askari K.O., Singh V.P., Dalezios N.R., Cruseberg T.C. Polymer concrete. *International Journal of Hydrology*. 2018; 2(5). DOI: 10.15406/ijh.2018.02.00135

6. Moiseeva V.I., Pirogova Ya.V., Tyumencev M.E., Pan'kov P.A. Nanotechnologies in the field of production of building materials. *Innovations and investments*. 2019; 11:293-297. EDN UFODHQ. (rus.).

7. Dahlan A.S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete. *Journal of Molecular Structure*. 2021; 1223:128896. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.128896

8. Bhatta D.P., Singla S., Garg R. Microstructural and strength parameters of Nano-SiO₂ based cement composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46:6743-6747. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.276

9. Pimenov A.I., Ibragimov R.A., Izotov V.S. Influence carbon nanotubes and methods of administration on properties of cement compositions. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2014; 6(666):26-30. EDN SXHLNH. (rus.).

10. Ponomarev A.N. High-quality concrete. Analysis of the possibilities and practice of using nanotechnology methods. *Magazine of Civil Engineering*. 2009; 6(8):25-33. EDN NBMZNP. (rus.).

11. Samchenko S.V., Zemskova O.V., Kozlova I.V. Stabilization of dispersions of carbon nanotubes by ultrasonic treatment. *Technique and Technology of Silicates*. 2014; 21(3):14-18. EDN SNAVPH. (rus.).
12. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Lukyanova N.A. Influence of activation methods on the structural and technological characteristics of nanomodified cement compositions. *Nanotechnologies in Construction a Scientific Internet-Journal*. 2022; 14(6):481-492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492
13. Galinovskiy A.L., Moiseev V.A., Osipkov A.S., Provatorov A.S., Yakovlev G.I. Development of ultrajet technology of receiving suspensions with carbon nanotubes. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2016; 11(143):37-43. EDN WXSXGP. (rus.).
14. Monina T.A., Antonov I.I. Modern materials and technologies in prototyping. Nanotechnology and nanomaterials. Decorative Art and Environment. *Gerald of the RGHPU*. 2021; 2-2:20-28. EDN RPZZMQ. (rus.).
15. Andreeva A.V., Davydova N.N., Burenina O.N., Petukhova E.S. Improvement of quality of fine-grained concrete with cement mechanical activation. *Scientific Journal of KubGAU*. 2013; 94:451-460. EDN RUYCNX. (rus.).
16. Ibragimov R.A., Korolev E.V. Intensification of hydration processes during mechanical activation of the binder. *Fundamental principles of construction materials science : collection of reports of the International Online Congress*. 2017; 806-808. EDN YLPFNJ. (rus.).
17. Pimenov S.I., Ibragimov R.A. The effect of mechanochemical activation of cement suspension on the physical and technical properties of cement compositions. *Fundamental principles of construction materials science : collection of reports of the International Online Congress*. 2017; 797-805. EDN MCDMRK. (rus.).
18. Lyashenko D.A., Perfilov V.A., Vesova L.M. Fine-grained nanomodified concrete. *Engineering Journal of Don*. 2022; 10(94):369-378. EDN NKKAXY. (rus.).
19. Lyashenko D.A., Perfilov V.A., Lukyanitsa S.V., Lupinogin V.V. Expanded fiber gypsum material. *Engineering Journal of Don*. 2022; 5(89):393-402. EDN AZQKTA. (rus.).
20. Usherenko S., Figovsky O. Superdeep penetration as the new physical tool for creation of composite materials. *Advanced Materials Research*. 2008; 47-50:395-402. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.395
21. Figovsky O., Shapovalov L. New nonisocyanate polyurethane coatings. *China Coatings Journal (CCJ)*. 2006; 2:49-58.
22. Kudryavtsev B., Figovsky O., Egorova E. The use of nanotechnology in production of bioactive paints and coatings. *J. Scientific Israel-Technological Advantages*. 2003; 15:209-215.
23. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Miroshnikov E.V., Shapovalov N.A. Evaluation of the effectiveness of the use of nanostructured binder in the production of lightweight cellular composites. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2011; 4:48-51. EDN OXVZTH. (rus.).
24. Zhernovskij I.V., Osadchaya M.S., Cherevatova A.V., Strokova V.V. Aluminosilicate nanostructured binder based on granite raw materials. *Construction Materials*. 2014; 1-2:38-41. EDN QCDQDD. (rus.).
25. Shestakov N.I., Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Semenov A.P., Smirnyagina N.N. Asphalt concrete using carbon nanomodifiers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015; 6:21-24. EDN ULFTKT. (rus.).

Received October 8, 2023.

Adopted in revised form on April 11, 2024.

Approved for publication on April 11, 2024.

BIONOTES: **Dmitry A. Lyashenko** — postgraduate student, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1054316, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitry.lyashenko@yandex.ru;

Vladimir A. Perfilov — Doctor of Technical Sciences, Professor; Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0000-0001-9196-7572; vladimirperfilov@mail.ru.

Contribution of the author:

Dmitry A. Lyashenko — writing the source text, final conclusions.

Vladimir A. Perfilov — scientific guidance, research concept, development of methodology, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1125-1137

Применение цеолита в многокомпонентных мелкозернистых бетонах для строительной 3D-печати

Алина Дмитриевна Когай, Анастасия Вячеславовна Пузатова,
Мария Александровна Дмитриева, Владимир Нояхович Лейцин
*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта);
г. Калининград, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Требования, предъявляемые к материалам для 3D-строительной печати, могут быть обеспечены на стадии проектирования состава мелкозернистого бетона за счет введения модифицирующих компонентов. Природные цеолиты возможно рассматривать как высокоэффективные тонкодисперсные добавки, регулирующие свойства бетонных смесей, которые особо актуальны для отдаленных районов строительства, являющихся месторождениями этого минерального сырья.

Материалы и методы. Приведен обзор научной литературы и экспериментальных данных по использованию цеолитов в строительстве в качестве минеральной добавки в бетоны с различной степенью замещения цемента в составе, оптимально отвечающем требованиям строительной 3D-печати. Определены сроки схватывания, густота и динамическое напряжение сдвига для бетонных смесей различных составов, а также плотность и пределы прочности при сжатии и изгибе для затвердевшего бетона. Оценена активность цеолита по результатам прочностных и калориметрических испытаний.

Результаты. Наилучшие показатели установлены у образцов с 5–15%-ным содержанием цеолита по массе цемента. Представлена информация по срокам достижения критической густоты бетонной смеси до уровня применимости смеси в 3D-принтере, которая для составов с 5–15%-ным цеолитом сокращается на 1 ч–1 ч 20 мин по сравнению с контрольным составом, причем промежутки времени применимости смеси может быть оптимизирован выбором концентрации цеолита. Начальная густота бетонной смеси, оцененная по глубине погружения пестика прибора Вика, не претерпевала значительных изменений при увеличении дозировки цеолита в составе.

Выводы. Цеолит способствует улучшению механических характеристик мелкозернистого бетона и регулированию сроков схватывания в зависимости от выбранной концентрации минерального наполнителя, что позволяет рассматривать его в качестве эффективного компонента бетонов, пригодных для реализации в аддитивных технологиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цеолит, минеральная добавка, мелкозернистый бетон, прочность, сроки схватывания, изотермическая калориметрия, аддитивные технологии

Благодарности. Данное исследование поддержано из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» БФУ им. И. Канта.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Когай А.Д., Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Применение цеолита в многокомпонентных мелкозернистых бетонах для строительной 3D-печати // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1125–1137. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1125-1137

Автор, ответственный за переписку: Алина Дмитриевна Когай, ad.kogai@yandex.ru.

Adding zeolite to multi-component fine-grain concrete used for 3D construction printing

Alina D. Kogai, Anastasia V. Puzatova, Maria A. Dmitrieva, Vladimir N. Leitsin
Immanuel Kant Baltic Federal University; Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Requirements, applied to materials used for 3D construction printing, can be met by adding modifiers at the stage of designing fine-grained concrete compositions. Natural zeolites can be considered highly effective finely dispersed additives capable of adjusting properties of concrete mixtures, that are particularly relevant for remote development areas having deposits of this mineral raw material.

Materials and methods. Research works and experimental data are reviewed to analyze the use of zeolites as a mineral additive in construction. Zeolites can partially, to different extents, replace cement in concrete to optimally meet the requirements of construction 3D printing. The setting time, the density and the dynamic shear stress of various compositions of concrete mixtures, as well as the density, ultimate compressive and bending strength values were determined for mature concrete. Results of strength and calorimetric testing were used to evaluate the activity of zeolite.

Results. The best performance was demonstrated by the specimens with 5–15 % zeolite content by the cement weight. The information is provided about the time it takes for the density of concrete mixture to become critical to ensure its suit-

ability for a 3D printer, which is reduced by 60 to 80 minutes for compositions with the 5–15 % zeolite content compared to the controlling composition, provided that and the mixture suitability period can be optimized by choosing the concentration of zeolite. The initial density of the concrete mixture, evaluated using the Vicat cone penetrometer, did not demonstrate any great changes when the share of zeolite was increased.

Conclusions. Zeolite improves mechanical characteristics of fine-grained concrete and adjusts the setting time depending on the concentration of the mineral filler. Hence, zeolite can be considered as an effective component of concretes suitable for additive technologies.

KEYWORDS: zeolite, mineral additive, fine-grained concrete, strength, setting time, isothermal calorimetry, additive technologies

Acknowledgements. This research was funded by the Russian Federal Academic Leadership Program Priority–2030 at the Immanuel Kant Baltic Federal University.

FOR CITATION: Kogai A.D., Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Leitsin V.N. Adding zeolite to multi-component fine-grain concrete used for 3D construction printing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1125–1137. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1125–1137 (rus.).

Corresponding author: Alina D. Kogai, ad.kogai@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие 3D-печати выходит на ведущие места во всех сферах науки и промышленности, включая строительную индустрию. Для аддитивных технологий (АТ) в данной отрасли ключевая задача — разработка состава печатающего материала, изучение его свойств и характеристик.

Основу бетона для трехмерной печати составляет вяжущее (цемент, зола уноса [1], микрокремнезем [2], каолиновая глина [3] и т.д.), роль заполнителя выполняет песок различных фракций, а для создания внутреннего каркаса используется дисперсное армирование различными видами фиброволокна. Крупный заполнитель не применяется ввиду ограниченного диаметра сопла экструдера и необходимости соблюдения правильной геометрии экструдированного слоя. Важным фактором при проектировании состава бетона для АТ является введение различных модификаторов, придающих материалу свойства, необходимые для реализации печати (пластификаторы, ускорители или замедлители твердения, водоредуцирующие добавки и т.д.).

Правильный подбор состава способствует соответствию качества как бетонной смеси, так и затвердевшего камня предъявляемым требованиям, исходя из обеспечения особенностей технологического оборудования и режимов формования печатных конструкций. Анализ литературных данных [4] показал, что для получения материала с требуемыми характеристиками бетонная смесь должна обладать определенными свойствами, соответствующими АТ. На стадии экструзии можно выделить дисперсность, оптимальную формуемость, высокую пластическую прочность, возможность транспортировки по трубам, низкую усадку, высокую адгезию между слоями, равномерное и ускоренное схватывание смеси. После твердения готовое изделие должно иметь высокую прочность, однородность, адгезию и стабильность, низкую плотность и теплопроводность.

Требуемые характеристики бетонных смесей формируются на стадии разработки и обоснования состава бетонных смесей [5]. Использование тонкодисперсных добавок, какими могут быть цеолиты [6, 7], в бетонных смесях для АТ увеличивает прочность цементного камня на ранних сроках твердения, что служит определяющим фактором при формировании строительно-технических характеристик для технологии 3D-печати [5].

Цеолиты представляют собой большую группу близких по составу и свойствам минералов вулканическо-осадочного происхождения и водные алюмосиликаты кальция и натрия из подкласса каркасных силикатов со стеклянными или перламутровым блеском. Цеолиты имеют особую «пористую» структуру. Данные минералы обладают уникальными свойствами, например молекулярно-ситовым эффектом, высокими ионообменными, сорбционными и каталитическими свойствами, которые появляются за счет наличия в кристаллической решетке окон, полостей и каналов [8]. Эти свойства определяют широкий спектр областей использования цеолитов и обширное распространение в мире. Благодаря открытой каркасно-полостной структуре цеолиты нашли свое применение в промышленности [8].

Цеолиты подразделяются на природные и синтетические [9]. Природные цеолиты — более дешевый материал, важное значение приобретает разработка месторождений природных цеолитов, практическое применение которых определяется их ионообменными и адсорбционными свойствами, термической и химической стойкостью, механической прочностью, строением кристаллической решетки и катионным составом [10].

Объемы выработки природных цеолитов в мире составляют около 30 млн т и растут ежегодно до 25 %. Масштабы обуславливаются относительно низкой себестоимостью добычи и производства минералов, а следовательно, и невысокой рыночной стоимостью. Лидеры по экспорту природного цеолитового сырья — Китай, Япония и США. На территории стран СНГ изучено более 50 месторождений

цеолитовых пород с прогнозными запасами около 10 млрд т [10]. В России основные промышленно разработанные месторождения природного цеолита сосредоточены в районах Сибири и Дальнего Востока [11].

В вопросах анализа экономической эффективности природных материалов для использования в разных областях промышленности большую роль играет территориальный фактор, характеризующий дополнительные расходы для регионов на доставку и логистику. Особенно это актуально для отдаленных районов России, где внимание уделяется разработке сырья регионального значения. На территории Калининградской области располагается Прибалтийский цеолитоносный район (ПЦР), который входит в состав Восточно-Европейской цеолитоносной провинции. Наиболее высокие концентрации цеолитов были установлены в отложениях верхнего Оксфорда, что служит отличительной особенностью ПЦР [12]. В настоящее время цеолиты являются новым видом минерального сырья для Калининградской области, содержание на отдельных участках в породах которых достигает промышленно значимых объемов. На сегодняшний день в Калининградской области известно девять проявлений цеолитоносных пород с содержаниями цеолита от 20 до 55 %: Куршское, Новгородское, Холмогоровское, Усть-Неманское, Охотное, Калиновка, Междуречье, Бабушкино, Южное [13]. Прогнозные ресурсы цеолитоносных пород оценены на 400 млн т, при среднем содержании клиноптилолита в породах 30 % и мощности продуктивной пачки до 30 м. Максимальное содержание клиноптилолита в цеолитсодержащих породах отмечается в проявлении Междуречье на глубине залегания 321 м и составляет 45–50 % [13].

После 1970-х гг. минерал стал активно использоваться в составе пуццоланового и гидравлического цемента, строительного камня и теплоизоляционных материалов пониженной плотности благодаря стойкости к агрессивным химическим воздействиям среды [9]. Также известно, что цеолиты обладают пуццолановыми свойствами и относятся к числу природных пуццоланов из-за наличия в составе реактивного кремнезема (SiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3). Вступая в реакцию с портландитом во время гидратации, они превращают его в гели C-S-H, улучшая микроструктуру цементного камня, тем самым увеличивая долговечность бетона, водонепроницаемость и морозостойкость [14]. Введение природного цеолита снижает коррозионные процессы. Кроме того, цеолит связывает свободную гидроксид кальция, что способствует ускоренному структурообразованию [15].

Благодаря введению природного цеолита в рецептуру бетона можно существенно сократить содержание дорогостоящего клинкера без ухудшения свойств вяжущего [16–23]. Доказано, что введе-

ние цеолита в состав бетона в количестве 5 и 10 % от массы цемента помогает увеличению прочностных показателей на сжатие до 37 и 28 % соответственно [14]. В работе [24] прирост прочности при сжатии 28 % сохранился и для 17 % замещения цемента цеолитом.

Цеолиты используются в качестве наполнителя строительных материалов, имеющего способность поглощать излишнюю влагу в цементном растворе и постепенно ее отдавать по мере необходимости, тем самым содействуя полной гидратации цемента.

В исследовании [25] обнаружено, что оптимальная степень наполнения бетона цеолитом находится в интервале 20–25 % по массе цемента. Как отмечается в труде [26], введение в состав бетонной смеси цеолита не вызывает необходимости применения дополнительных модификаторов.

Благодаря улучшенным свойствам современные цементные бетоны с введением цеолита могут использоваться в различных областях стройиндустрии с повышенными требованиями к качеству бетона [27, 28], например в 3D-строительстве.

Цель исследования — изучение влияния цеолита на свойства мелкозернистой бетонной смеси, отвечающей требованиям трехмерной строительной печати, а также оценка реакционной способности многокомпонентной смеси по результатам прочностных и калориметрических испытаний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки перспективности разработки цеолитоносных месторождений и эффективности использования этого материала как добавки в бетон применялся цеолит вулканический по ТУ 08.11.12-003-00327325428–2019, производитель «Закарпатский цеолитовый завод». Свойства материала в соответствии с паспортом качества представлены в табл. 1.

Важным показателем качества цеолита является удельная поверхность материала, характеризующая суммарную поверхность всех частиц, отнесенную к массе дисперсного материала. Для испытания был использован прибор для измерения удельной поверхности цемента и аналогичных порошкообразных материалов типа Т-3. По результатам испытания определена удельная поверхность частиц цеолита, составившая 382 м²/кг, что превышает значение аналогичного показателя для частиц цемента, применяемого в данном исследовании, — 347 м²/кг. Снимки материала, полученные при помощи стереомикроскопа Olympus SZX16, приведены на рис. 1.

Исследовалось влияние цеолита на характеристики как свежей бетонной смеси, так и затвердевшего бетонного камня. Опытные образцы изготавливались на базе многокомпонентного состава [29], содержащего микрокремнезем и высокоактивный метакаолин, и оптимально отвечающего требо-

Табл. 1. Свойства цеолита

Table 1. Zeolite properties

Показатель Characteristic	Значение Value
Минеральный состав, %: Chemical composition, mass fraction, %:	
• клиноптилолит; clinoptilolite;	75
• рентгеноаморфная фаза; x-ray amorphous phase;	8
• кварц; quartz;	9
• плагиоклаз; plagioclase;	3
• доломит; dolomite;	1
• гидрослюда hydrated mica	4
Химический состав, массовая доля, %: Chemical composition, mass fraction, %:	
• SiO ₂ ;	71,4
• Al ₂ O ₃ ;	11,9
• CaO;	1,26
• K ₂ O;	3,02
• Fe ₂ O ₃ ;	1,14
• MgO;	0,45
• Na ₂ O;	2,086
• TiO ₂ ;	0,16
• MnO;	0,034
• P ₂ O ₅	0,02
Гранулометрический состав, мм Granulometric composition, mm	0–0,5
Внешний вид External view	Гранулы светло- серого цвета Light gray granules
Пористость, % Porosity, %	38–48
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	2200–2300
Твердость по Моосу Mohs hardness	3,5–4
Эффективный диаметр пор, нм Effective pore diameter, nm	0,4
pH	6,8–7,2
Адсорбционная емкость по воде, % Water adsorption capacity, %	34–38

ваниям АТ. Рассматривались составы с различной степенью замещения цемента цеолитом по массе:

- 0-й — контрольный (без цеолита);
- 1-й — 5 % цеолита;
- 2-й — 10 % цеолита;
- 3-й — 15 % цеолита;
- 4-й — 20 % цеолита;
- 5-й — 25 % цеолита;
- 6-й — 30 % цеолита.

Расход материалов на 1 м³ бетонной смеси представлен в табл. 2.

Использовались следующие материалы: цемент (М500, ЦЕМ I 42,5Н, ООО «Петербургцемент»); песок строительный (немытый, Калининградская область); микрокремнезем (отходы металлургической промышленности, Польша); метакраолин (высокоактивный ВМК-45, белый, ООО «СИНЕРГО», Челябинская область); гиперпластификатор Stachement 1267 (поликарбоксилатная основа, Stachema, Польша); цеолит (вулканический, «Закарпатский цеолитовый завод»).

Подготовленные сухие компоненты затворялись необходимым количеством воды для обеспечения одинаковой пластичности составов. Свежая бетонная смесь исследовалась на ряд реологических характеристик при температуре воздуха 20 ± 5 °С и влажности не менее 55 %. Густота полученных растворов на приборе Вика с пестиком, а также начало и конец схватывания на приборе Вика с иглой установлены по стандартным методикам ГОСТ 310.3–76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема». По значениям глубины погружения пестика прибора Вика оценивалось динамическое напряжение сдвига, характеризующее начальную вязкость состава в соответствии с публикацией [30].

С целью выявления прочностных характеристик на сжатие и растяжение при изгибе формировались образцы-балочки размерами 40 × 40 × 160 мм в стальных формах, которые через сутки распалубливались, и образцы перемещались в камеру твердения для созревания при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не менее 90 %. Проведение прочностных испытаний в возрасте

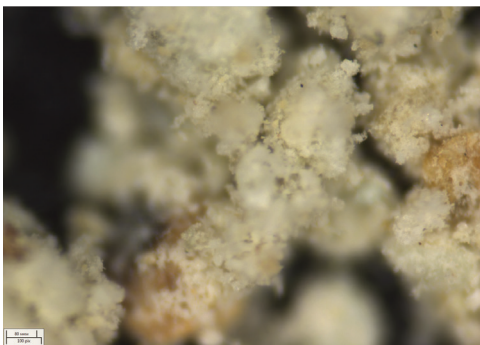
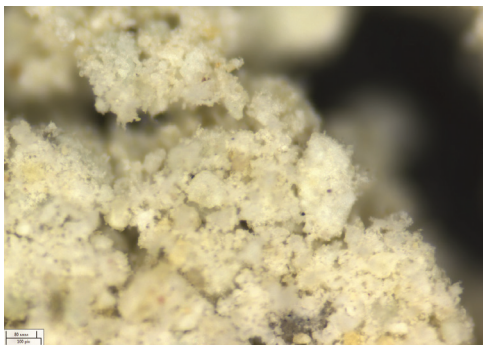


Рис. 1. Снимки цеолита при 10-кратном увеличении

Fig. 1. Zeolite photos, 10x power magnification

Табл. 2. Составы
Table 2. Compositions

Компонент Component	Номер состава Composition number						
	0	1	2	3	4	5	6
Цемент, кг Cement, kg	545,3	518,03	490,77	463,5	436,24	408,97	381,71
Песок, кг Sand, kg	1168	1168	1168	1168	1168	1168	1168
Микрокремнезем, кг Silica fume, kg	156	156	156	156	156	156	156
Метакаолин, кг Metakaolin, kg	78	78	78	78	78	78	78
Гиперпластификатор, л Hyper-plasticizer, l	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Цеолит, кг Zeolite, kg	–	27,27	54,53	81,8	109,06	136,33	163,59
Вода, л Water, l	399,4	368,68	368,68	399,4	399,4	399,4	399,4

7 и 28 сут на испытательной машине ToniNORM и подготовка образцов производились в соответствии с ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Перед проведением испытаний образцы маркировались, измерялись и взвешивались для определения плотности бетона.

Прочностные испытания также позволяют оценить активность исследуемой добавки при выполнении эксперимента в соответствии с ГОСТ 25094–2015 «Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности»¹. Следуя методике испытания, сравнивалась прочность специально подготовленного контрольного состава на измельченном песке (600 г цемента, 1400 г измельченного песка, 100 г гипса) и исследуемого (600 г цемента, 1400 г цеолита, 100 г гипса). Сухие компоненты затворялись необходимым количеством воды для обеспечения нормальной густоты состава (30,8 и 37 % соответственно). Отлитые образцы-балочки 40 × 40 × 160 мм испытывались на прочность при сжатии в возрасте 24 ч после указанного в работе¹ режима прогрева. Активность добавки определялась статистической оценкой значимости различий прочности на сжатие образцов из исследуемой смеси с добавкой и образцов из контрольной смеси с песком на основании расчета *t*-критерия при принятии гипотезы об однородности и симметричности распределения результатов установления прочности образцов.

Активность цеолитового наполнителя также оценивалась по результатам изотермической калориметрии цемента с частичным замещением цеолитом с применением 8-канального калориметра TAM Air

в соответствии с методикой ГОСТ 310.5–88 «Цементы. Метод определения тепловыделения»². Калориметрический метод испытаний основан на учете и анализе количества тепла, которое выделяется в процессе экзотермической реакции гидратации цемента [31–33]. Для его проведения в стеклянную ампулу объемом 20 мл помещалась 6-граммовая навеска цемента с различным процентом замещения цеолитовым наполнителем, которая затворялась 3 мл воды. Ампула закрывалась крышкой с тефлоновой прокладкой и помещалась в один из двойных каналов калориметра с поддержанием постоянной температуры 20 ± 1 °С, в парное отделение перемещался инертный материал — песок.

Комплексный анализ активности цеолитового наполнителя в совокупности с оценкой кинетики набора прочности и сроков схватывания исследуемых составов позволяет сделать вывод об эффективности цеолита в качестве минеральной добавки, ее влиянии на свойства бетона и оптимальных дозировках для достижения требуемых показателей качества материала, применимого для 3D-строительной печати.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения густоты по глубине погружения пестика прибора Вика, динамического напряжения сдвига и сроков схватывания смеси, а также массы и плотности затвердевших образцов-балочек в возрасте 28 сут представлены в табл. 3.

Представленные экспериментальные результаты позволяют отметить, что изменение массы и плотности бетона имеет немонотонный характер и не отражает зависимости от степени наполнения состава цеолитом. Глубина погружения пестика при-

¹ ГОСТ 25094–2015. Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности : введ. 01.01.2017. М. : Стандартинформ, 2016. 7 с.

² ГОСТ 310.5–88. Цементы. Метод определения тепловыделения : вввед. 01.01.1989. М. : Издательство стандартов, 1988. 6 с.

Табл. 3. Реологические характеристики составов
Table 3. Rheological characteristics of compositions

Показатель Characteristic	Номер состава Composition number						
	0	1	2	3	4	5	6
Средняя масса образца, г Average specimen weight, g	505,6	513,9	512,5	520,3	512,63	516,27	501,22
Средняя плотность образца, кг/м³ Average specimen density, kg/m³	1975	2078	2001	2032	2002	2017	1958
Глубина погружения пестика прибора Вика, мм Vicat cone driving depth, mm	1,5	1,5	2	1,5	2	2	1,5
Динамическое напряжение сдвига, МПа Dynamic shear stress, MPa	0,064	0,064	0,048	0,064	0,048	0,048	0,064
Начало схватывания, ч-мин Initial setting, h-min	2,45	1,45	1,35	1,25	2,00	1,55	1,20
Конец схватывания, ч-мин Final setting, h-min	3,15	2,50	2,40	3,10	3,30	3,05	2,35

бора Вика и динамическое напряжение сдвига, характеризующие густоту и вязкость соответственно, практически не изменяются и остаются стабильными, при этом с ростом концентрации цеолита наблюдается существенное уменьшение сроков схватывания. Зависимость сокращения сроков схватывания от концентрации цеолита немонотонна, что свидетельствует о наличии оптимальной концентрации добавки. Происходит характерный перегиб кривых в точках, характеризующих начало и конец схватывания при введении 20 % цеолита, отмечаемый в работе [25], посвященной исследованию влияния цеолитов Амурской области на свойства бетона.

В настоящем исследовании оптимальной для 3D-печати концентрацией цеолита можно считать 5–15%-ное введение по массе цемента (составы № 1–3). Графическое представление изменения сроков схватывания бетонных смесей приведено на рис. 2.

Графические результаты прочностных испытаний на сжатие и растяжение при изгибе в возрасте 7 и 28 сут показаны на рис. 3 и 4 соответственно. Значения средней прочности образцов в серии, коэффициент вариации *V* и прирост прочности основных составов относительно контрольного представлены в табл. 4.

Результаты экспериментальных исследований позволяют отметить прирост прочности образцов, содержащих цеолит, в сравнении с контрольным составом. Наилучшие показатели отмечаются у составов с содержанием 5 % (состав № 1), 10 % (состав № 2) и 15 % (состав № 3) цеолита. Прирост прочности на растяжение при изгибе, рассчитанный в соответствии с публикацией³, в сравнении с кон-

³ ГОСТ 30459–2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности : введ. 01.01.2011. М. : Стандартинформ, 2010. 18 с.

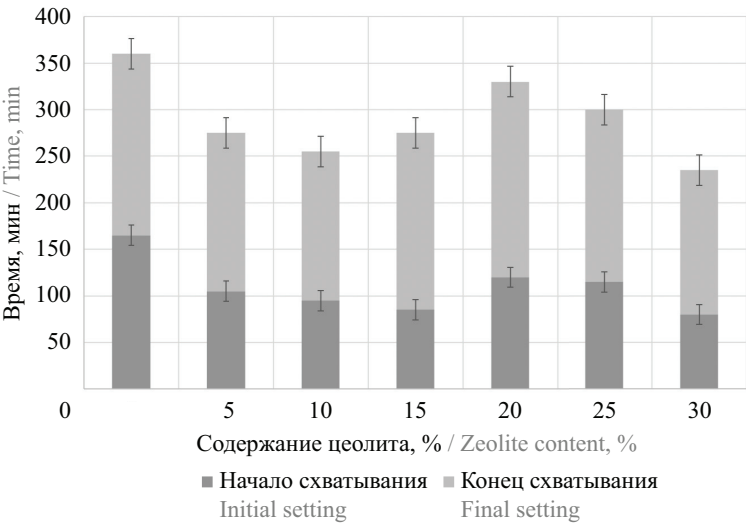


Рис. 2. Сроки схватывания
Fig. 2. Setting time

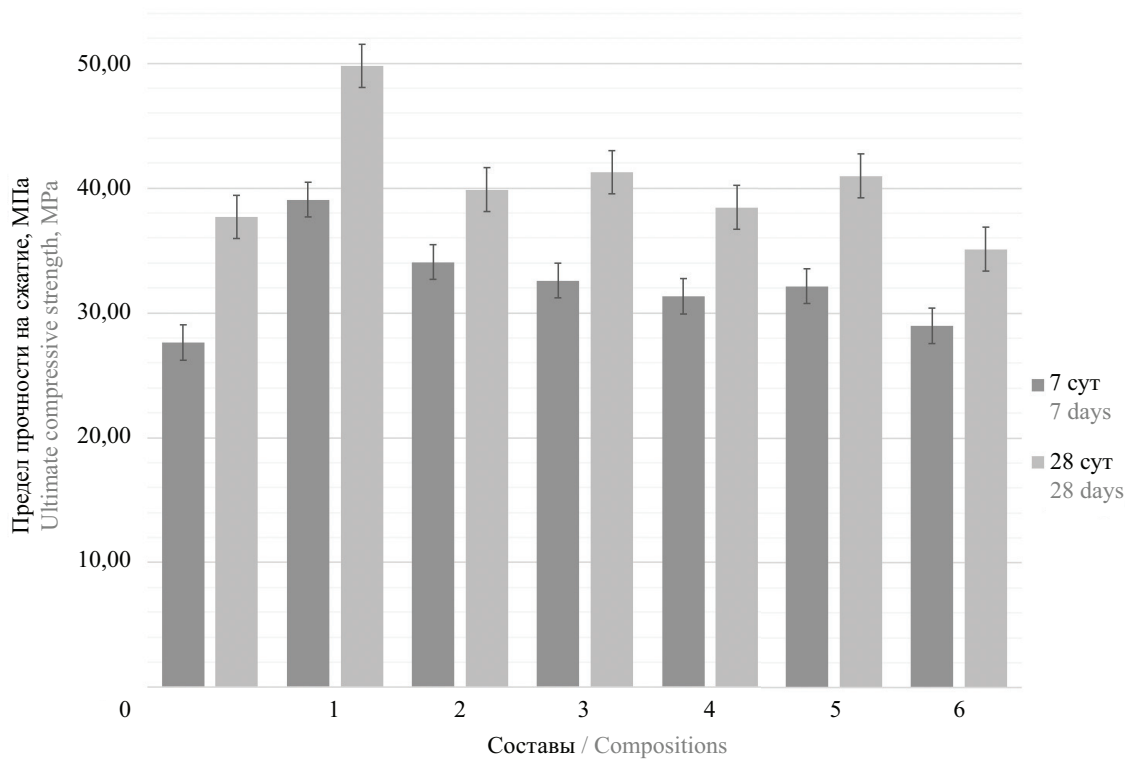


Рис. 3. Прочность на сжатие
Fig. 3. Compressive strength

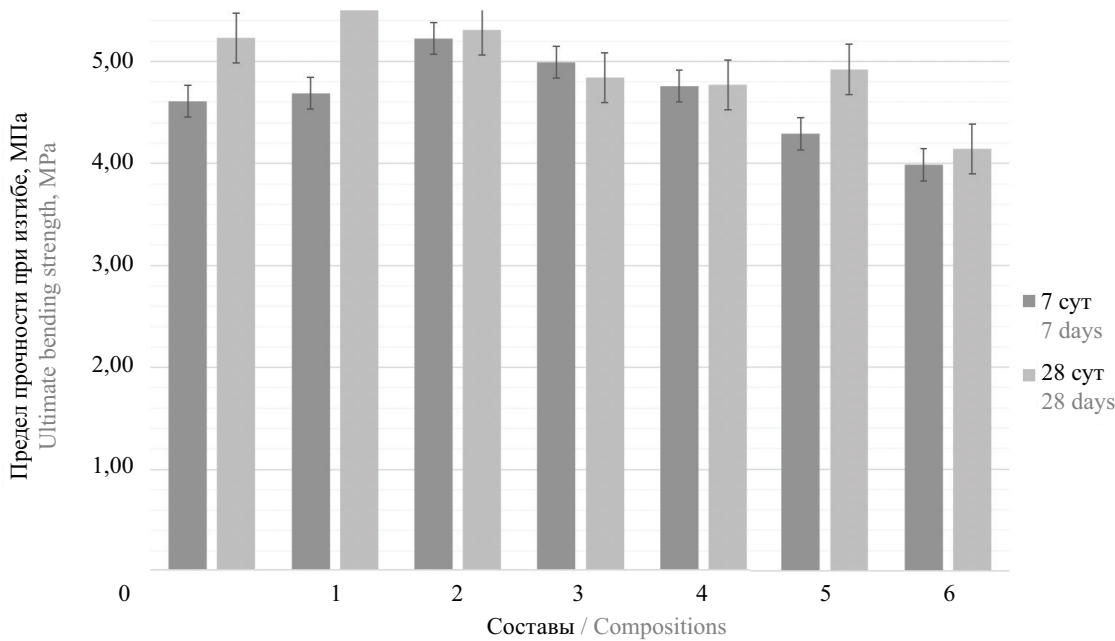


Рис. 4. Прочность на растяжение при изгибе
Fig. 4. Tensile strength in bending

трольным составом в возрасте 7 и 28 сут составил соответственно: 1,69 и 19,4 % для состава № 1; 13,56 и 1,49 % для состава № 2 и 8,47 и –7,46 % для состава № 3. Прирост прочности на сжатие в возрасте 7 и 28 сут составил соответственно: 41,38 и 32,31 % для состава № 1; 23,28 и 5,78 % для состава № 2

и 17,97 и 9,48 % для состава № 3. Результаты показывают, что наиболее интенсивный набор прочности модифицированных составов в сравнении с контрольным происходит в первые 7 сут, постепенно замедляясь к моменту набора проектной прочности. Данный факт подтверждает эффективность приме-

Табл. 4. Прочность образцов
Table 4. Strength of specimens

Номер состава Composition number	7 сут 7 days					
	Сжатие Compression			Изгиб Bending		
	Прочность, МПа Strength, MPa	V , %	Прирост, % Growth, %	Прочность, МПа Strength, MPa	V , %	Прирост, % Growth, %
0	27,63	1,87	–	4,61	2,94	–
1	39,06	4,92	41,38	4,69	10,0	1,69
2	34,06	2,43	23,28	5,23	5,17	13,56
3	32,58	4,85	17,97	4,99	5,41	8,47
4	31,33	2,14	13,39	4,76	2,84	3,39
5	32,15	5,17	16,48	4,29	8,33	–6,78
6	28,99	2,54	4,92	3,98	5,88	–13,56
28 сут 28 days						
0	37,7	4,68	–	5,23	5,17	–
1	49,8	3,51	32,31	6,25	7,81	19,40
2	39,88	3,65	5,78	5,31	5,09	1,49
3	41,27	1,01	9,48	4,84	5,59	–7,46
4	38,46	5,15	2,02	4,77	2,84	–8,96
5	40,99	2,12	8,74	4,92	4,76	–5,97
6	35,12	2,79	–6,76	4,13	6,54	–20,90

нения цеолитового наполнителя с целью управления ранним структурообразованием бетона, что играет большую роль в строительной трехмерной печати. При превышении дозировки цеолита более 15 % наблюдается спад эффективности добавки, однако в любой дозировке прочность на сжатие модифицированных составов выше, чем у контрольных. Исключением является состав с 30%-ным введением цеолита, что свидетельствует о существовании предельно допустимой концентрации добавки.

Таким образом, можно сделать вывод об эффективности использования цеолита для управления свойствами многокомпонентных мелкозернистых бетонов для 3D-печати, обеспечивающих ранний набор прочности. Оптимально введение 5–15 % цеолита по массе цемента, так как в этом диапазоне

достигается значительный прирост прочности и сокращение сроков схватывания. Выбор необходимой концентрации из данного диапазона должен быть осуществлен с учетом технологических требований к процессу трехмерной печати строительных элементов и технических особенностей 3D-принтера.

Результаты оценки активности цеолитового наполнителя, произведенные в соответствии с методикой², приведены в табл. 5.

По результатам расчета $S_1 \approx S_2 \leq 2$ МПа, при этом $S_1^2/S_2^2 = 1,8 \leq 2,82$, где 2,82 — табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости и 11 степенях свободы для обеих дисперсий, следовательно, гипотеза об однородности и симметричности распределения результатов определения прочности образцов верна, испытания

Табл. 5. Определение активности цеолита
Table 5. Zeolite activity determination

Название состава Composition	Средняя прочность на сжатие, МПа Average compressive strength, MPa	S^2	S	S_1^2/S_2^2	t -критерий t -criterion
Контрольный состав с измельченным песком Control composition with crushed sand	4,5	0,0638	0,2526	1,8	–21,14
Исследуемый состав с цеолитом Tested composition with zeolite	2,59	0,0363	0,1906		

Примечание: S — среднее квадратическое отклонение (standard deviation).
Note: S stands for the mean square deviation.

выполнены удовлетворительно. Оценка активности цеолитового наполнителя, произведенная в соответствии с методикой¹, указала на неактивный характер добавки, так как *t*-критерий, согласно расчетам, составил менее 15, что является критерием отсутствия активности исследуемого материала.

В ходе проведения калориметрического анализа получены результаты изменения тепловыделения гидратации для каждого состава в зависимости от времени. Полученные данные представлены на графиках нормированного теплового потока и суммарной тепловой энергии (рис. 5, 6).

В соответствии с полученными результатами заключено, что при введении цеолита в состав реакция гидратации наступает значительно раньше в сравнении с контрольным образцом бездобавоч-

ного цемента, что может быть объяснено связыванием свободной гидроокиси кальция. При увеличении концентрации цеолита более 5 % по массе цемента отмечается наличие двух основных пиков реакции вместо одного, наблюдаемого у состава № 1 и контрольного, что свидетельствует об изменении химического состава образцов и реакционной способности минеральных компонентов, либо изменении кинетики процессов гидратации вследствие освобождения связанной цеолитом воды. В каждый момент времени отчетливо виден спад тепловой энергии при увеличении концентрации цеолита — это указывает на меньшую реакционную активность цеолита в сравнении с цементом, что коррелирует с ранее полученными результатами по определению активности цеолита в соответствии с публикацией¹.

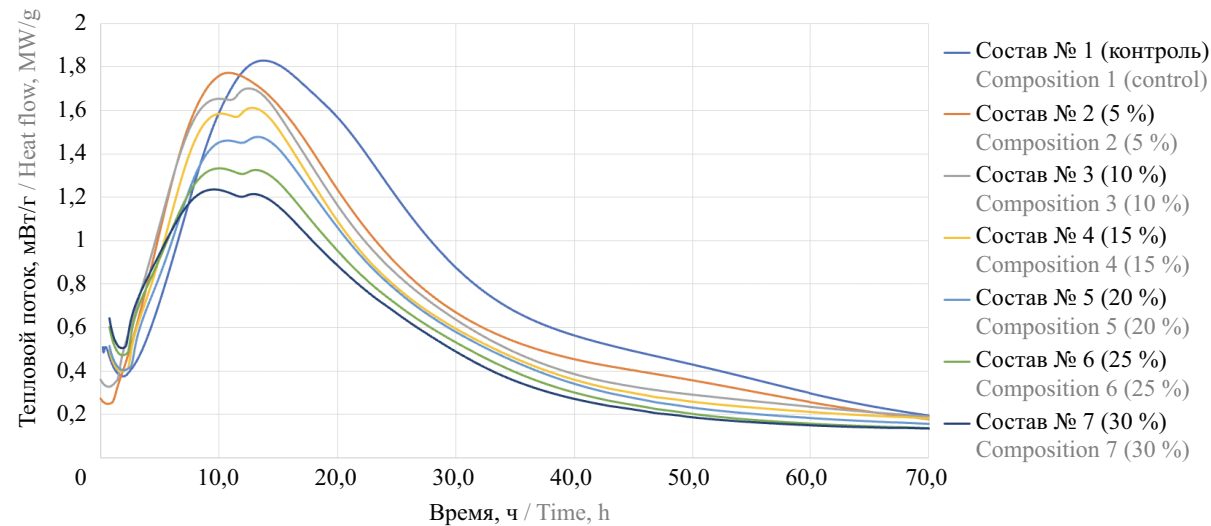


Рис. 5. Тепловой поток

Fig. 5. Heat flow

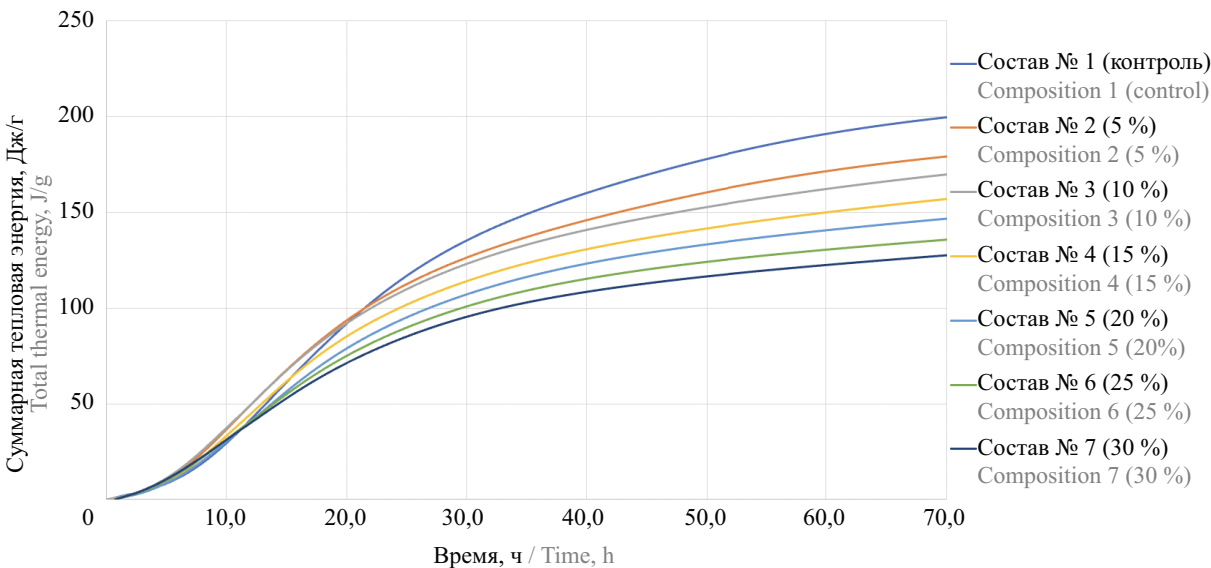


Рис. 6. Суммарная тепловая энергия

Fig. 6. Total thermal energy

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования была доказана эффективность применения цеолита при производстве многокомпонентных мелкозернистых бетонов, пригодных для реализации в строительной 3D-печати. На основании анализа опыта использования цеолитов в строительстве описана актуальность применения природных минералов в качестве сырьевого строительного материала в отдаленных районах строительства, являющихся месторождениями цеолитов. Выявлено, что зависимости показателей массы и плотности бетона, глубины погружения пестика прибора Вика в смесь и динамического напряжения сдвига от концентрации цеолита имеют немонотонный характер. Среди составов с различным процентом замещения портландцемента цеолитом от 5 до 30 % наиболее эффек-

тивными по результатам прочностных испытаний на сжатие и растяжение при изгибе были признаны дозировки 5–15 % по массе цемента. Наиболее интенсивный прирост прочности в 41,38 % зафиксирован для образцов состава № 1, испытываемых в раннем возрасте, что указывает на возможность регулирования начального структурообразования бетонов с применением цеолитов. Введение добавки также способствует значительному сокращению сроков начала схватывания (с 2 ч 45 мин до 1 ч 25 мин для состава № 3) с возможностью оптимизации промежутка времени до конца схватывания за счет выбора концентрации цеолита. Анализ реакционной способности многокомпонентной смеси по результатам calorиметрического и прочностного анализов указал на отсутствие активности цеолита, что в свою очередь приводит к изменению кинетики реакции гидратации при замене части цемента цеолитом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G.* Study of ash-slag wastes of electric power plants of Mongolia applied to their utilization in road construction // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 1558–1562. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.111
2. *Tak S., Gupta P., Kumar A., Sofi A., Yun C.M.* Effect of using silica fume as a partial replacement of cement in concrete // *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.205
3. *Du H., Dai Pang S.* High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 264. P. 120152. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120152
4. *Канесса Э., Фонда К., Зеннаро Г.* Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития. Международный центр теоретической физики Абдус Салам, 2013. 192 с.
5. *Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А.* Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. Т. 20. № 4. С. 122–134. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-122-134. EDN XWCDCP.
6. *Panda B., Bhagath Singh G.V.P., Unluer C., Tan M.J.* Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. Pp. 610–619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185
7. *Khan S.A., Koç M., Al-Ghamdi S.G.* Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures : a systematic review for built environmental applications // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 303. P. 127027. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127027
8. *Муминов С.З.* Исследования в области термодинамики и термохимии адсорбции на глинистых минералах. Ташкент : Фан, 1987. 144 с.
9. *Васильянова Л.С., Лазарева Е.А.* Цеолиты в экологии // *Новости науки Казахстана*. 2016. № 1 (127). С. 61–85. EDN XUOOGT.
10. *Тотурбиев Б.Д.* Природные цеолиты — эффективные минералы для изготовления строительных материалов // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. 2012. № 58. С. 47–51.
11. *Красный Л.И., Морозов А.Ф., Петров О.В.* Геология и полезные ископаемые России. СПб., 2000. Т. 1. 552 с.
12. *Побережный С.К., Комовников Б.К.* Доклад об экологической обстановке в Калининградской области в 2012 году. Калининград, 2013. 204 с.
13. *Лукьянова Н.В., Богданов Ю.Б., Васильева О.В., Варгин Г.П.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист N-(34). Калининград. Объяснительная записка. СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 226 с.
14. *Морозова Н.Н., Кайс Х.А.* О роли природного цеолита на прочность мелкозернистого бетона // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19. № 10. С. 64–68. EDN VXPEOR.
15. *Потанова Л.И., Кайс Х.А.* Защитные свойства бетона с природным цеолитом по отношению к стальной арматуре // *Инновационная наука*. 2016. № 6–2. С. 132–134. EDN WCFMGR.
16. *Rahul P., Ravella D.P., Chandra Sekhara Rao P.V.* Durability assessment of Self-Curing high performance concretes containing zeolite admixture // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 60. Pp. 502–507. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.352

17. Zheng X., Zhang J., Ding X., Chu H., Zhang J. Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. P. 123062. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123062

18. Dabbaghi F., Sadeghi-Nik A., Ali Libre N., Nasrollahpour S. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans // *Structures*. 2021. Vol. 34. Pp. 2617–2627. DOI: 10.1016/j.jistruc.2021.09.025

19. Das M., Adhikary S.K., Rudzionis Z. Effectiveness of fly ash, zeolite, and unburnt rice husk as a substitute of cement in concrete // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 61. Pp. 237–242. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.005

20. Sai Teja G., Ravella D.P., Chandra Sekhara Rao P.V. Studies on self-curing self-compacting concretes containing zeolite admixture // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 43. Pp. 2355–2360. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.682

21. Madhuri P.V., Kameswara Rao B., Chaitanya A. Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 47. Pp. 5369–5378. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.089

22. Erfanimesh A., Sharbatdar M.K. Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. P. 101781. DOI: 10.1016/j.job.2020.101781

23. Najimi M., Sobhani J., Ahmadi B., Shekar-chi M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35. Pp. 1023–1033. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038

24. Макаров Ю.А., Терешкин И.П., Лукашина С.В. Возможность использования природных цеолитов в качестве минеральной добавки для бетона //

Научный альманах. 2015. № 8 (10). С. 852–855. DOI: 10.17117/na.2015.08.852. EDN ULGTDF.

25. Ланкин С.В. Особенности прочности бетона, наполненного цеолитами // *Проблемы экологии Верхнего Приамурья*. 2014. Т. 16. С. 10–17. EDN SYQQKP.

26. Моргунов А.Н. Морозостойкость бетона, способы ее повышения // *Наука, техника и образование*. 2015. № 7 (13). С. 101–105.

27. Li J., Wu Z., Shi C., Yuan Q., Zhang Z. Durability of ultra-high performance concrete : a review // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 255. P. 119296. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119296

28. Kashani A., Ngo T. Production and placement of self-compacting concrete // *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*. 2020. Pp. 65–81. DOI: 10.1016/b978-0-12-817369-5.00003-9

29. Sharanova A., Dmitrieva M. Selection of compositions for additive technologies in construction // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 06018. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706018

30. Lootens D., Jousset P., Martinie L., Roussel N., Flatt R.J. Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests // *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39. Issue 5. Pp. 401–408. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.012

31. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 3 (38). С. 36–42. DOI: 10.5862/MCE.38.5. EDN PZETXS.

32. Sharanova A.V., Lenkova D.A., Panfilova A.D. Study of strength kinetics of sand concrete system of accelerated hardening // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 347. P. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/347/1/012014

33. Linderoth O., Wadsö L., Jansen D. Long-term cement hydration studies with isothermal calorimetry // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 141. P. 106344. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106344

Поступила в редакцию 16 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 14 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Алина Дмитриевна Когай — аспирант, ассистент Образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»; Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта); 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14; РИНЦ ID: 1091769, Scopus: 58567659200, ResearcherID: ABE-7359-2020, ORCID: 0000-0002-1635-9371; ad.kogai@yandex.ru;

Анастасия Вячеславовна Пузатова — заведующая лабораторией строительных материалов ЦВСО, старший преподаватель Образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»; Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта); 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14; РИНЦ ID: 1004740, Scopus: 57935892600, ResearcherID: I-5329-2018, ORCID: 0000-0002-3798-4969; asharanova@kantiana.ru;

Мария Александровна Дмитриева — доктор физико-математических наук, профессор Образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»; Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

нуила Канта (БФУ им. И. Канта); 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14; РИНЦ ID: 115921, Scopus: 16237921700, ResearcherID: C-7643-2014, ORCID: 0000-0002-9593-8653; admitrieva@kantiana.ru;

Владимир Нояхович Лейцин — доктор физико-математических наук, профессор Образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»; **Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта)**; 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14; РИНЦ ID: 11983, Scopus: 16239305000, ResearcherID: I-9610-2017, ORCID: 0000-0002-6140-256X; vleitsin@kantiana.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of ash-slag wastes of electric power plants of Mongolia applied to their utilization in road construction. *Procedia Engineering*. 2016; 150:1558-1562. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.111
2. Tak S., Gupta P., Kumar A., Sofi A., Yun C.M. Effect of using silica fume as a partial replacement of cement in concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.205
3. Du H., Dai Pang S. High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute. *Construction and Building Materials*. 2020; 264:120152. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120152
4. Canessa E., Fonda K., Zennaro G. *Accessible 3D printing for science, education and sustainable development*. International Center for Theoretical Physics Abdus Salam, 2013; 192. (rus.).
5. Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A. Performance characteristics of 3D printing construction mixes depending on thermally-modified peat additive. *Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20(4):122-134. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-122-134. EDN XWCDCP. (rus.).
6. Panda B., Bhagath Singh G.V.P., Unluer C., Tan M.J. Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 220:610-619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185
7. Khan S.A., Koç M., Al-Ghamdi S.G. Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures : a systematic review for built environmental applications. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 303:127027. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127027
8. Muminov S.Z. *Research in the field of thermodynamics and thermochemistry of adsorption on clay minerals*. Tashkent, Fan Publ., 1987; 144. (rus.).
9. Vasilyanova L.S., Lazareva E.A. Zeolites in ecology. *Science News of Kazakhstan*. 2016; 1(127):61-85. EDN XUOOGT. (rus.).
10. Toturbiev B.D. Natural zeolites — effective minerals for the manufacture of building materials. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 58:47-51. (rus.).
11. Krasny L.I., Morozov A.F., Petrov O.V. *Geology and minerals of Russia*. St. Petersburg, 2000; 1:552. (rus.).
12. Poberezhny S.K., Komovnikov B.K. *Report on the environmental situation in the Kaliningrad region in 2012*. Kaliningrad, 2013; 204. (rus.).
13. Lukyanova N.V., Bogdanov Yu.B., Vasilyeva O.V., Vargin G.P. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Series Central European*. Sheet N-(34). St. Petersburg, VSEGEI Mapping Factory, 2011; 226. (rus.).
14. Morozova N.N., Kais H.A. On the role of natural zeolite on the strength of fine-grained concrete. *Bulletin of the Technological University*. 2016; 19(10):64-68. EDN VXPEOR. (rus.).
15. Potapova L.I., Kais Kh.A. Protective properties of concrete with natural zeolite in relation to steel reinforcement. *Innovation Science*. 2016; 6-2:132-134. EDN WCFMGR. (rus.).
16. Rahul P., Ravella D.P., Chandra Sekhara Rao P.V. Durability assessment of Self-Curing high performance concretes containing zeolite admixture. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 60:502-507. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.352
17. Zheng X., Zhang J., Ding X., Chu H., Zhang J. Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles. *Construction and Building Materials*. 2021; 288:123062. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123062
18. Dabbaghi F., Sadeghi-Nik A., Ali Libre N., Nasrollahpour S. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. *Structures*. 2021; 34:2617-2627. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.025
19. Das M., Adhikary S.K., Rudzionis Z. Effectiveness of fly ash, zeolite, and unburnt rice husk as a substitute of cement in concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 61:237-242. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.005
20. Sai Teja G., Ravella D.P., Chandra Sekhara Rao P.V. Studies on self-curing self-compacting concretes containing zeolite admixture. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 43:2355-2360. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.682

21. Madhuri P.V., Kameswara Rao B., Chaitanya A. Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 47:5369-5378. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.089
22. Erfanimanesh A., Sharbatdar M.K. Mechanical and microstructural characteristics of geopolymers paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101781. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101781
23. Najimi M., Sobhani J., Ahmadi B., Shekarchi M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*. 2012; 35:1023-1033. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038
24. Makarov Yu.A., Tereshkin I.P., Lukashina S.V. Possibility of using natural zeolites as a mineral additive for concrete. *Science Almanac*. 2015; 8(10):852-855. DOI: 10.17117/na.2015.08.852. EDN ULGTDF. (rus.).
25. Lankin S.V. Features of the strength of concrete filled with zeolites. *Problems of ecology of the Upper Amur region*. 2014; 16:10-17. EDN SYQQKP. (rus.).
26. Morgun A.N. Frost resistance of concrete, ways to improve it. *Science, technology and education*. 2015; 7(13):101-105. (rus.).
27. Li J., Wu Z., Shi C., Yuan Q., Zhang Z. Durability of ultra-high performance concrete : a review. *Construction and Building Materials*. 2020; 255:119296. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119296
28. Kashani A., Ngo T. Production and placement of self-compacting concrete. *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*. 2020; 65-81. DOI: 10.1016/b978-0-12-817369-5.00003-9
29. Sharanova A., Dmitrieva M. Selection of compositions for additive technologies in construction. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06018. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706018
30. Lootens D., Jousset P., Martinie L., Rousset N., Flatt R.J. Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *Cement and Concrete Research*. 2009; 39(5):401-408. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.012
31. Adamtsevich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. The use of calorimetry to predict the growth of the strength of accelerated hardening cement systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 3(38):36-42. DOI: 10.5862/MCE.38.5. EDN PZETXS. (rus.).
32. Sharanova A.V., Lenkova D.A., Panfilova A.D. Study of strength kinetics of sand concrete system of accelerated hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 347:012014. DOI: 10.1088/1757-899X/347/1/012014
33. Linderöth O., Wadsö L., Jansen D. Long-term cement hydration studies with isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Research*. 2021; 141:106344. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106344

Received November 16, 2023.

Adopted in revised form on February 14, 2024.

Approved for publication on February 14, 2024.

B I O N O T E S : **Alina D. Kogai** — postgraduate student, assistant of the Educational and Scientific Cluster of “Institute of High Technologies”; **Immanuel Kant Baltic Federal University**; 14 Alexandr Nevsky st., Kaliningrad, 236041, Russian Federation; ID RSCI: 1091769, Scopus: 58567659200, ResearcherID: ABE-7359-2020, ORCID: 0000-0002-1635-9371; ad.kogai@yandex.ru;

Anastasia V. Puzatova — head of the laboratory of building materials CPCE, senior lecturer of the Educational and Scientific Cluster of “Institute of High Technologies”; **Immanuel Kant Baltic Federal University**; 14 Alexandr Nevsky st., Kaliningrad, 236041, Russian Federation; ID RSCI: 1004740, Scopus: 57935892600, ResearcherID: I-5329-2018, ORCID: 0000-0002-3798-4969;

Maria A. Dmitrieva — Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Educational and Scientific Cluster of “Institute of High Technologies”; **Immanuel Kant Baltic Federal University**; 14 Alexandr Nevsky st., Kaliningrad, 236041, Russian Federation; ID RSCI: 115921, Scopus: 16237921700, ResearcherID: C-7643-2014, ORCID: 0000-0002-9593-8653; admitrieva@kantiana.ru;

Vladimir N. Leitsin — Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Educational and Scientific Cluster of “Institute of High Technologies”; **Immanuel Kant Baltic Federal University**; 14 Alexandr Nevsky st., Kaliningrad, 236041, Russian Federation; ID RSCI: 11983, Scopus: 16239305000, ResearcherID: I-9610-2017, ORCID: 0000-0002-6140-256X; vleitsin@kantiana.ru.

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

Исследование устойчивости ячеистых конструкций из плоского металлического шпунта

Егор Максимович Терихов, Александр Сергеевич Аншаков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В мировой практике ячеистые конструкции применяются в качестве как временных, так и постоянных сооружений. Они изготавливаются из взаимосвязанных шпунтовых свай, образующих смежные ячейки, и обычно заполняются грунтом обратной засыпки. При использовании ячеистых конструкций в качестве перемычки массивные ячейки позволяют проводить работы насухо и при необходимости производить выемку грунта основания на небольшую глубину. Так как в шпунте ячеистых конструкций из-за их формы практически не возникает изгибающих моментов, а работают они в основном на растяжение, в них применяются плоские шпунтовые сваи.

Материалы и методы. Выполнены проверки устойчивости ячеистой конструкции в соответствии с действующими нормативными документами. Для анализа и сравнения методик расчета устойчивости выбрано несколько диаметров и несколько глубин погружения шпунта. Помимо устойчивости для всех расчетных сечений определен коэффициент запаса по прочности замков. Полученные аналитическими методами результаты сравнивались с результатами, полученными в расчетном комплексе Midas FEA NX в двухмерной и трехмерной постановке.

Результаты. Получены графики зависимости коэффициентов устойчивости от заглубления и диаметра ячеистой конструкции. Проведено сравнение результатов, полученных в расчетном комплексе Midas FEA NX в двухмерной и трехмерной постановке, с аналитическими методами расчетов устойчивости.

Выводы. Численное моделирование в двухмерной постановке задачи дает схожие результаты с аналитическим решением и значительно меньший запас устойчивости в сравнении с трехмерной задачей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ячеистые конструкции, расчет устойчивости, МКЭ, Midas FEA NX, статические расчеты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Терихов Е.М., Аншаков А.С. Исследование устойчивости ячеистых конструкций из плоского металлического шпунта // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1138–1150. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1138-1150

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Аншаков, anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

Stability analysis of cellular structures made of flat metal sheet piles

Egor M. Terikhov, Aleksandr S. Anshakov

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

ABSTRACT

Introduction. Cellular structures are internationally used as temporary and permanent structures. They are made of interconnected sheet piles forming adjacent cells, and they are usually filled with backfilling soil. When cellular structures are used as cofferdams, massive cells (1) make the use of cement and mortar unnecessary and (2) allow for the foundation soil to be excavated to a shallow depth. Since there are practically no bending moments in sheet piles of cellular structures due to their shape and sheet piles are mainly in tension, flat sheet piles are used to make these structures.

Materials and methods. In this study, stability of a cellular structure was analyzed in compliance with effective regulatory documents. Several values of (1) the diameter of sheet piles and (2) the sheet pile driving depth were selected to study and compare methods of stability analysis. In addition to stability, the safety factor of interlocks was found for all design sections. Analytically obtained results were compared with those computed in two- and three-dimensional settings using Midas FEANX software package.

Results. Graphs were made to demonstrate the dependence between stability factors, the depth and the diameter of a cellular structure. The results computed in two- and three-dimensional settings using Midas FEA NX software package were compared with those obtained using analytical methods of stability analysis.

Conclusions. Results of numerical modeling made in the two-dimensional setting are similar to the analytical solution. They show a substantially smaller stability factor compared to the three-dimensional problem.

KEYWORDS: cellular structures, stability analysis, FEM, Midas FEA NX, static analyses

FOR CITATION: Terikhov E.M., Anshakov A.S. Stability analysis of cellular structures made of flat metal sheet piles. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1138-1150. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1138-1150 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr S. Anshakov, anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ячеистые конструкции являются самонесущими гравитационными сооружениями, не требующими дополнительной анкеровки. Они служат экономичным решением для работ при строительстве гидротехнических объектов на больших глубинах длинномерных сооружений¹. В мировой практике ячеистые конструкции применяются в качестве как временных, так и постоянных сооружений. К временным сооружениям относятся перемычки, к постоянным — причалы, пирсы, швартовые палы и волнорезы [1–11]. При использовании ячеистых конструкций в качестве перемычки массивные ячейки позволяют проводить работы насухо [12–16] и при необходимости производить выемку грунта основания на небольшую глубину [17–21]. Они изготавливаются из взаимосвязанных шпунтовых свай, образующих смежные ячейки, и обычно заполняются грунтом обратной засыпки. Формы ячеек — круглые, диафрагменные и в виде листа клевера. Чаще всего используются круглые ячейки.

Так как в шпунте ячеистых конструкций из-за их формы практически не возникает изгибающих моментов, а работают они главным образом на растяжение, в них используются плоские шпунтовые сваи.

В соответствии с нормативным документом² основные размеры цилиндрических ячеек определяются из условия их устойчивости и прочности несущих элементов при воздействии горизонтальных нагрузок и собственного веса конструкции эксплуатационных нагрузок, формирующихся на ее территории. Глубина погружения шпунта в грунт основания устанавливается расчетом устойчивости на плоский сдвиг или по круглоцилиндрической поверхности. Также расчет устойчивости можно произвести численным моделированием. В данном исследовании для численного моделирования работы конструкции используется программный комплекс (ПК) Midas FEA NX.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка устойчивости различных вариантов ячеистой конструкции выполнена с помощью нор-

мативных документов^{3, 4, 5}, в которых приведены ключевые положения для расчета данных сооружений. Также осуществлены проверки устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали. Поверхности разрушения можно представить в виде дуг логарифмических спиралей, пересекающих выступы обеих стенок. При разрушении между выступами стенок ячейки образуется выпуклая поверхность обрушения. Можно предположить, что поверхность обрушения представляет собой логарифмическую спираль с соответствующим углом внутреннего трения.

Преимущество использования логарифмической спирали состоит в том, что сила, возникающая в результате трения вдоль поверхности обрушения, проходит через ее полюс, и поэтому она не добавляет никакого удерживающего момента. Чтобы проверить устойчивость, необходимо различать случаи погружения, они представлены на рис. 1.

Результаты аналитических расчетов устойчивости сопоставлялись с численным решением в ПК Midas FEA NX в двухмерной и трехмерной постановках. Эта методика общепринята и применяется при проектировании гидротехнических сооружений в России и за рубежом [22–25].

Программный комплекс Midas FEA NX, использующий метод конечных элементов, применяется для решения различных задач, связанных со взаимодействием между сооружениями и их основаниями. Midas FEA NX позволяет учитывать поэтапность возведения сооружений, моделировать различные комбинации нагрузок и воздействий, что делает его удобным инструментом для оценок напряженно-деформированного состояния проектируемых сооружений [24].

В данной работе исследуется устойчивость перемычки из плоского металлического шпунта AS 500-9,5. Одной из особенностей конструкции является строительство «с воды». Для погружения шпунта используются специальные направляющие — кондукторы, которые дают возможность получить необходимую геометрию ячейки. После погружения шпунтовой ячейки осуществляется заполнение инертным материалом, как правило щебнем или песком. На следующем этапе производят

¹ Левачев С.Н., Корчагин Е.А., Пиляев С.И., Катаржи И.Г., Шурухин Л.А. Порты и портовые сооружения : учебное издание. М. : Издательство АСВ, 2015. 536 с.

² СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства.

³ СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).

⁴ СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения.

⁵ СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.

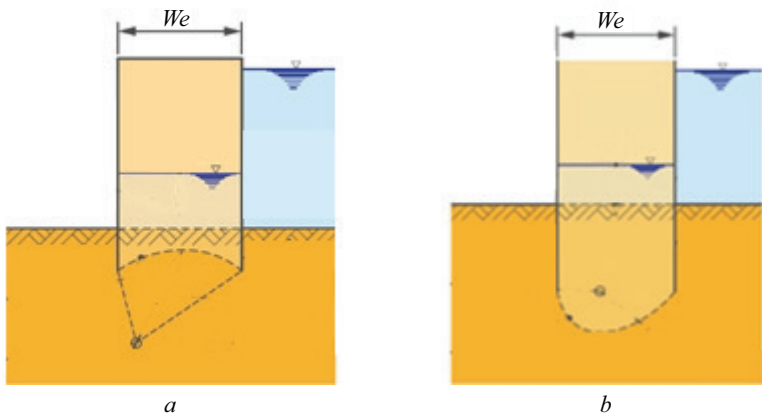


Рис. 1. Возможные формы потери устойчивости сооружения по поверхности логарифмической спирали: *a* — при частичном заглублении ячейки в грунт основания; *b* — при значительном заглублении ячейки в грунт основания

Fig. 1. Patterns of structural stability loss over the surface of a logarithmic spiral: *a* — if a cell is slightly driven in foundation soil; *b* — if a cell is deeply driven in foundation soil

выемку грунта до проектной отметки и осушение котлована [25].

Принятая к расчетам схема сооружения приведена на рис. 2.

В рамках тестовой задачи физико-механические характеристики грунтов основания и засыпки принимались одинаковыми. Принятые в расчете характеристики грунтов и конструкционных материалов приведены в табл. 1 [25].

На устойчивость ячеистой конструкции при одинаковых грунтовых условиях и нагрузках могут влиять диаметр ячеек и глубина погружения шпунта. Для анализа и сравнения методик расчета устойчивости необходимо выбрать несколько диаметров и несколько глубин погружения шпунта. Принятые к расчетам размеры сечений приведены в табл. 2.

Грунты основания и обратной засыпки в модели были выполнены из трехмерных элементов в форме

тетраэдров и гексаэдров. Плоские шпунтовые сваи задавались двумерными элементами оболочки прямоугольной формы. Для моделирования конструкционных материалов (шпунт) применялась линейно-упругая модель материала (модель Linear Elastic — LE), для которой напряжения прямо пропорциональны деформациям. Для грунтовых материалов — модель Мора – Кулона (Mohr – Coulomb — MC).

Контакты между шпунтовыми сваями и грунтом задавались с помощью элементов интерфейса для моделирования взаимодействия между поверхностями или линиями разграничения. Для задания прочностных параметров контакта использовался коэффициент понижения 0,33 от значений прочностных характеристик грунта [25]. В двухмерной постановке стенки шпунта закреплялись между собой жесткими связями из предположения их малых

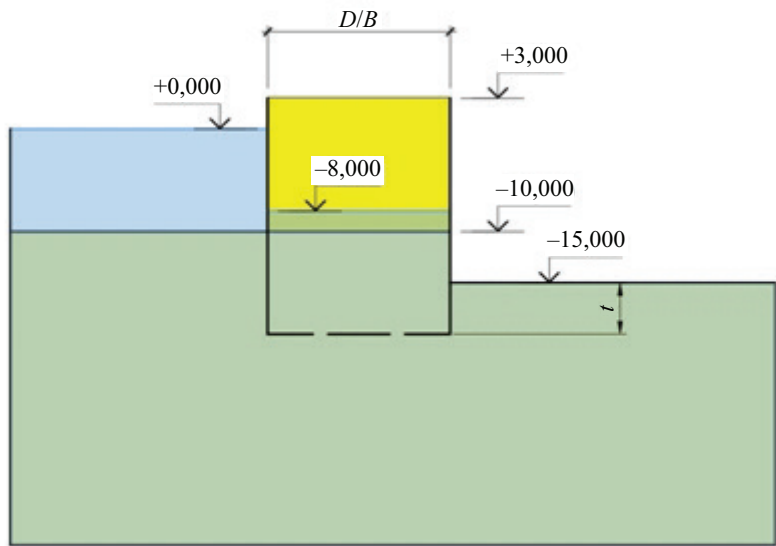


Рис. 2. Расчетная схема перемычки ячеистой конструкции

Fig. 2. Structural design of a cofferdam for a cellular structure

Табл. 1. Физико-механические характеристики материалов

Table 1. Physical and mechanical characteristics of materials

Наименование материала Material	Модель материала Material model	Модуль упругости E , МПа Modulus of elasticity E , MPa	Коэффициент Пуассона ν Poisson's ratio ν	Удельный вес сухого материала γ , кН/м ³ Unit weight of dry material γ , kN/m ³	Удельный вес в водонасыщенном состоянии γ_{sat} , кН/м ³ Unit weight (saturated) γ_{sat} , kN/m ³	Коэффициент пористости e Porosity e	Удельное сцепление c , кПа Unit adhesion c , kPa	Угол внутреннего трения φ , ° Internal friction angle φ , °
Песок Sand	Мор-Кулон Mohr-Coulomb	34	0,3	17	20	0,6	0	30
Сталь Steel	Упругий Elastic	210 000	0,3	76,5	–	–	–	–

Табл. 2. Принятые к расчетам размеры ячеистой конструкции

Table 2. Dimensions of a cellular structure used in computations

Диаметр ячейки D , м Cell diameter D , m	Эквивалентная ширина B , м Equivalent width B , m	Величина заглубления t , м Depth t , m
15,37	13,06	1,0
15,37	13,06	2,0
15,37	13,06	3,0
15,37	13,06	4,0
15,37	13,06	5,0
17,29	14,97	1,0
17,29	14,97	2,0
17,29	14,97	3,0
17,29	14,97	4,0
17,29	14,97	5,0
20,49	17,08	1,0
20,49	17,08	2,0
20,49	17,08	3,0
20,49	17,08	4,0
20,49	17,08	5,0
22,42	19,86	1,0
22,42	19,86	2,0
22,42	19,86	3,0
22,42	19,86	4,0
22,42	19,86	5,0

относительных перемещений, которыми можно пренебречь.

В качестве нагрузок в расчетной модели использовались давление воды на поверхность и нагрузка от собственного веса. В модели задавались граничные условия по перемещениям и поровому давлению. Граничные условия по перемещениям заданы одноузловыми связями на границах расчетной модели. Граничные условия порового давления задавались одноузловыми связями с указанием уровня воды в модели. В последней расчетной фазе для моделирования водопонижения на поверхности дна котлована задавалось нулевое значение порового давления [25].

Размеры расчетной области выбраны таким образом, чтобы была обеспечена необходимая точность результатов расчета. Размеры расчетной обла-

сти (140 × 102 × 40 м) должны позволить проявиться предельным состояниям, характерным как для сооружений, так и для грунтовых массивов. Общий вид конечно-элементной модели показан на рис. 3.

Учет этапности возведения сооружения в Midas FEA NX представлен на рис. 4.

Для анализа устойчивости использовался Strength reduction method (SRM), применяемый в Midas FEA NX. Метод заключается в итеративном понижении прочностных характеристик материалов в модели. Если в процессе расчета итерации система находится в равновесии, начинается следующая итерация. Коэффициент устойчивости равен понижающему коэффициенту прочностных характеристик материалов в последней сошедшей итерации решения [25].

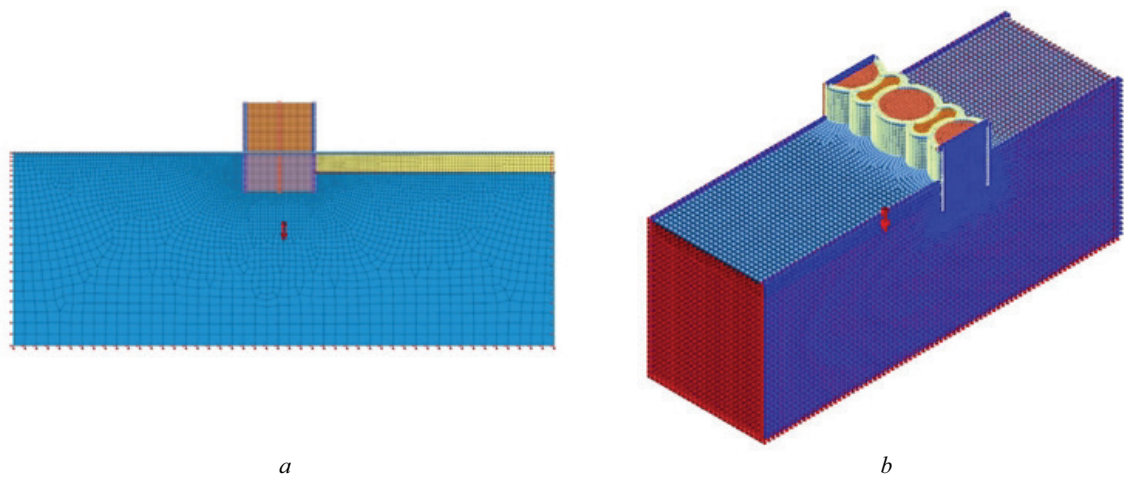


Рис. 3. Общий вид расчетной области: *a* — в двухмерной постановке; *b* — в трехмерной постановке
Fig. 3. General view of the computational domain: *a* — two-dimensional setting; *b* — three-dimensional setting

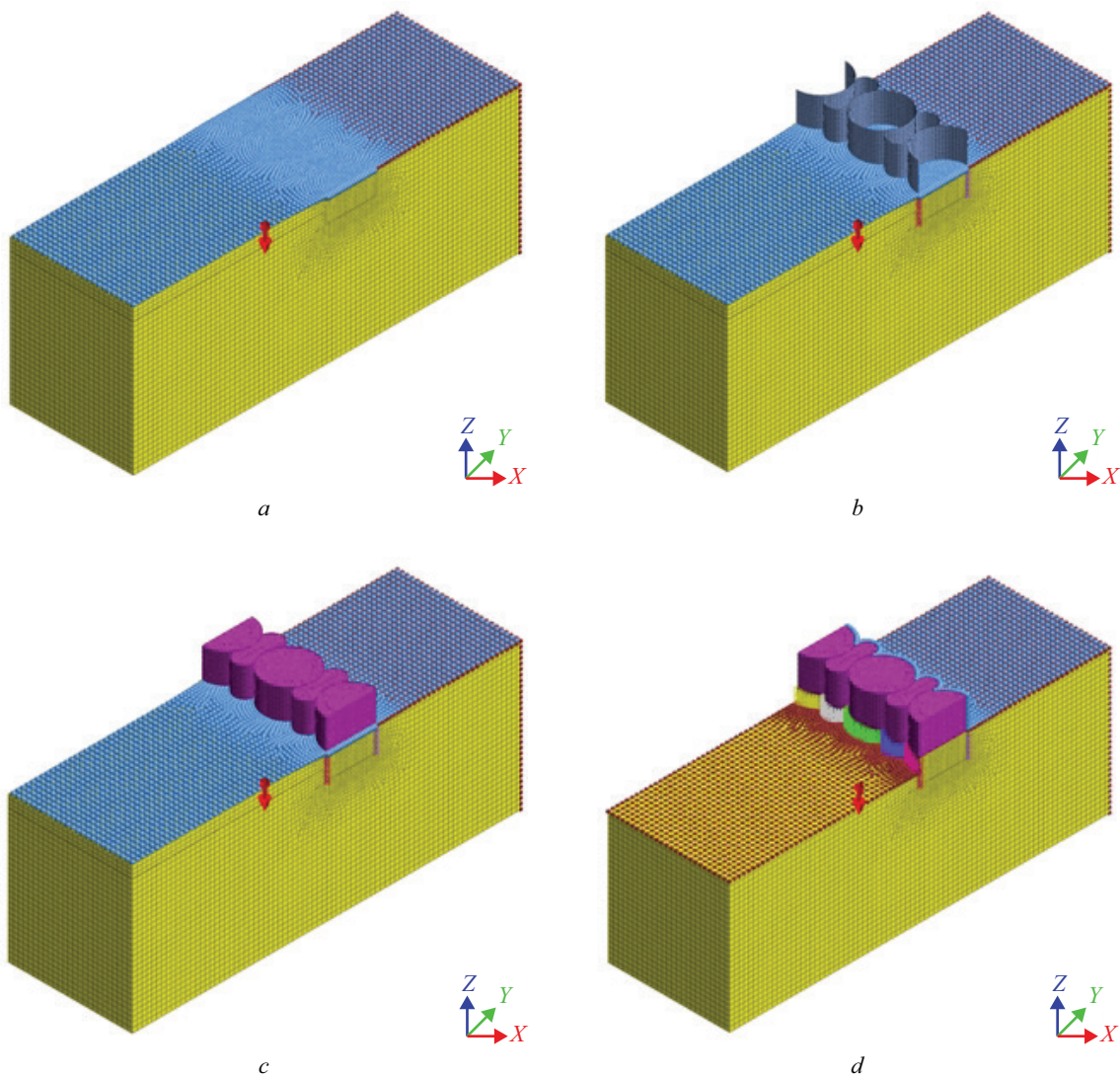


Рис. 4. Этапы расчета: *a* — исходные условия; *b* — погружение шпунта; *c* — заполнение ячеек грунтом обратной засыпки; *d* — выемка грунта и осушение котлована
Fig. 4. Computation stages: *a* — initial conditions; *b* — sheet pile driving; *c* — cell filling with backfill soil; *d* — pit excavation and dewatering

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты по всем нижеперечисленным аналитическим методам были проведены в Excel для всех расчетных сечений. Помимо устойчивости для всех расчетных сечений определен коэффициент запаса по прочности замков.

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Результаты различных проверок пронумерованы в следующем порядке:

1. Проверка устойчивости на сдвиг по вертикальной плоскости.
2. Расчет прочности замковых соединений.

3. Проверка устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали с центром спирали ниже подошвы сооружения.
4. Проверка устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали выше подошвы сооружения.
5. Проверка устойчивости на плоский сдвиг.
6. Проверка устойчивости на глубинный сдвиг.
7. Проверка устойчивости на сдвиг по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения.
8. Результат определения коэффициента устойчивости методом SRM в двухмерной постановке.
9. Результат определения коэффициента устойчивости методом SRM в трехмерной постановке.

Табл. 3. Результаты расчета коэффициентов устойчивости сооружения и запаса прочности замков

Table 3. Computation of the stability factor for a structure and the safety factor for an interlock

Диаметр, м Diameter, m	Эквивалентная ширина, м Equivalent width, m	Заглубление, м Depth, m	Коэффициенты устойчивости Safety factors								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
15,37	13,06	1	1,71	3,48	1,13	3,14	1,60	1,07	1,17	–	–
		2	1,56		1,02	2,60	1,49	1,02	1,18	–	–
		3	1,43		0,93	2,18	1,43	0,99	1,20	–	–
		4	1,32		0,85	1,86	1,39	0,99	1,22	–	–
		5	1,22		0,86	1,61	1,36	1,00	1,24	–	–
17,29	14,97	1	1,93	3,10	1,36	4,36	1,83	1,20	1,20	–	–
		2	1,75		1,22	3,59	1,70	1,14	1,21	–	–
		3	1,60		1,11	2,99	1,62	1,12	1,22	–	–
		4	1,48		1,02	2,53	1,56	1,11	1,24	–	–
		5	1,37		0,95	2,17	1,53	1,12	1,26	–	–
20,49	17,08	1	2,28	2,63	1,59	6,44	2,08	1,40	1,23	1,28	1,50
		2	2,07		1,43	5,21	1,94	1,33	1,24	1,29	–
		3	1,90		1,31	4,28	1,83	1,29	1,26	1,30	1,59
		4	1,75		1,20	3,58	1,76	1,28	1,27	1,37	–
		5	1,63		1,12	3,04	1,71	1,29	1,29	1,38	1,60
22,42	19,86	1	2,50	2,41	1,92	9,77	2,42	1,56	1,28	–	–
		2	2,27		1,74	7,74	2,24	1,48	1,29	–	–
		3	2,08		1,58	6,27	2,11	1,43	1,30	–	–
		4	1,92		1,46	5,18	2,02	1,42	1,31	–	–
		5	1,78		1,35	4,53	1,95	1,43	1,32	–	–

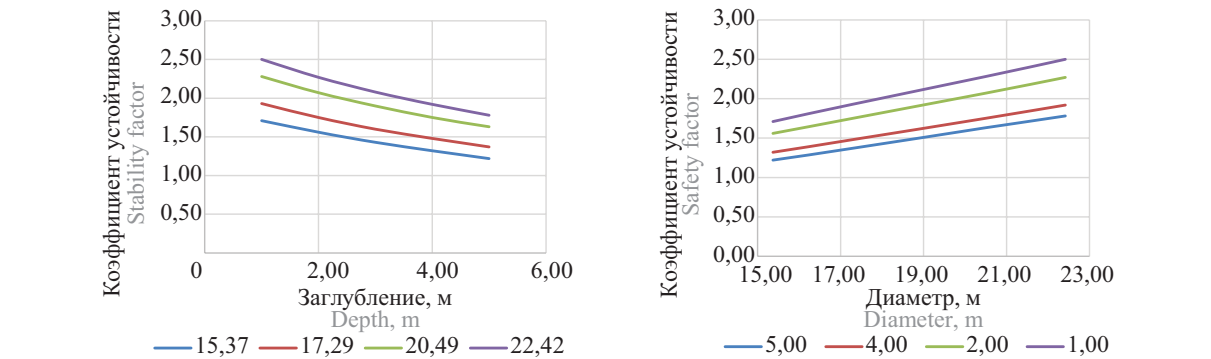


Рис. 5. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по вертикальной плоскости в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек

Fig. 5. Dependence between the shear stability factor in the vertical plane, sheet pile depth and the cell diameter

Графики зависимости коэффициентов устойчивости от заглубления и диаметра приведены на рис. 5–11. Результаты расчета сдвиговых деформаций, наглядно представляющих тело выпора в ходе потери устойчивости для задач в двухмерной постановке, приведены на рис. 12, для задач в трехмерной постановке — на рис. 13.

Формы потери устойчивости по логарифмическим спиралям и на плоский сдвиг в меньшей мере описывают работу сооружения, возведенного на дисперсных грунтах, не учитывая влияние ниже-лежащих грунтов. Данные формы потери устойчивости более актуальны для ячеистых сооружений, возведенных на скальных основаниях, которые

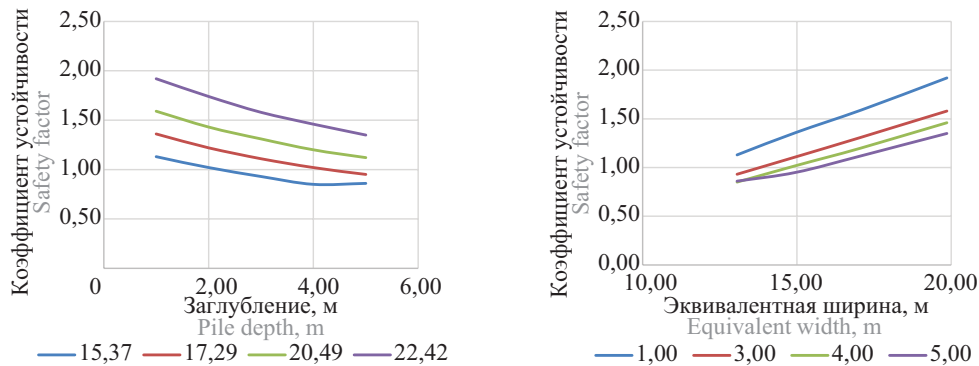


Рис. 6. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали с центром ниже подошвы сооружения в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек (эквивалентной ширины)
Fig. 6. Dependence between the shear stability factor for a logarithmic spiral with the center below the foundation bed, the sheet pile depth and the cell diameter (equivalent width)

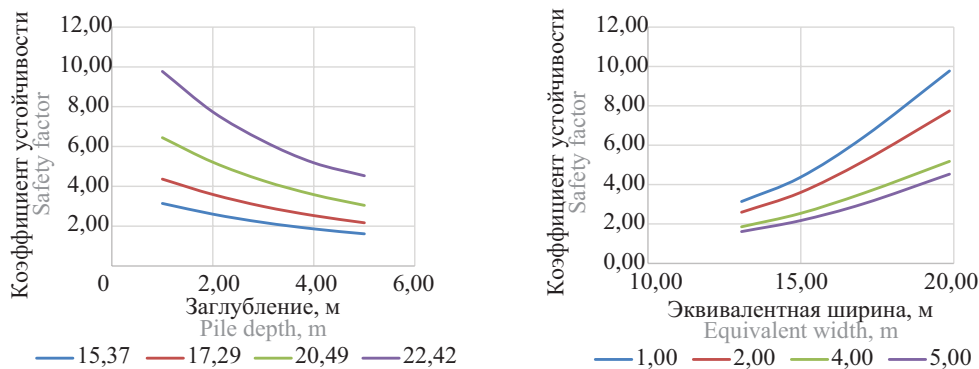


Рис. 7. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали с центром выше подошвы сооружения в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек
Fig. 7. Dependence between the shear stability factor for a logarithmic spiral with the center above the foundation bed, the sheet pile depth and the cell diameter

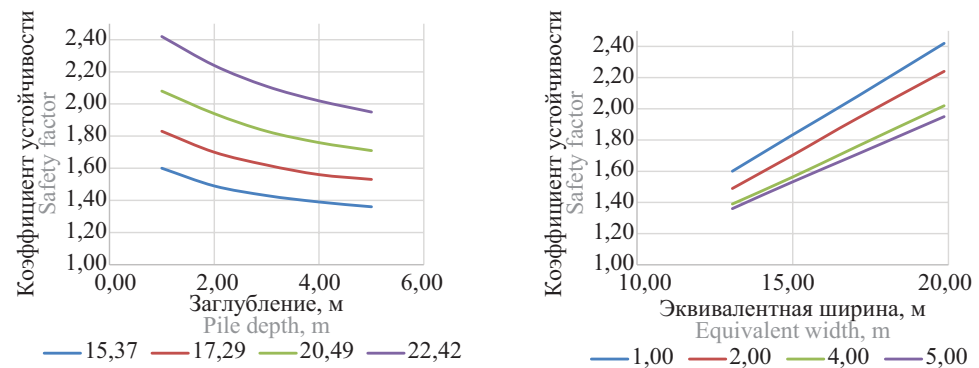


Рис. 8. График зависимости коэффициента устойчивости на плоский сдвиг в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек
Fig. 8. Dependence between the in-plane shear stability factor, the sheet pile depth, and the cell diameter

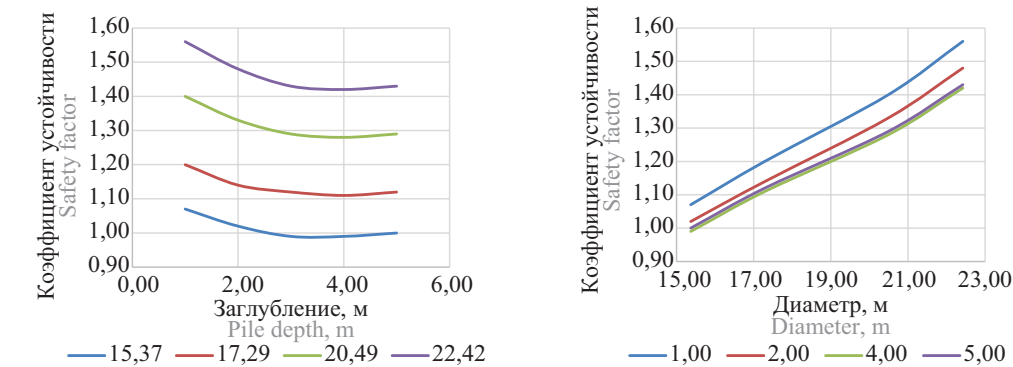


Рис. 9. График зависимости коэффициента устойчивости на глубинный сдвиг в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек

Fig. 9. Dependence between the deep-seated shear stability factor, the sheet pile depth, and the cell diameter

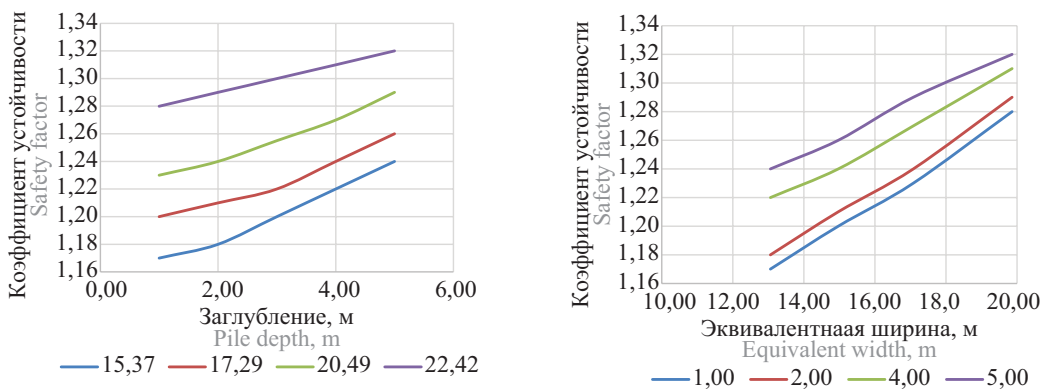


Рис. 10. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по круглоцилиндрической поверхности скольжения в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек

Fig. 10. Dependence between the shear stability factor for the circular cylindrical sliding surface, the sheet pile depth, and the cell diameter

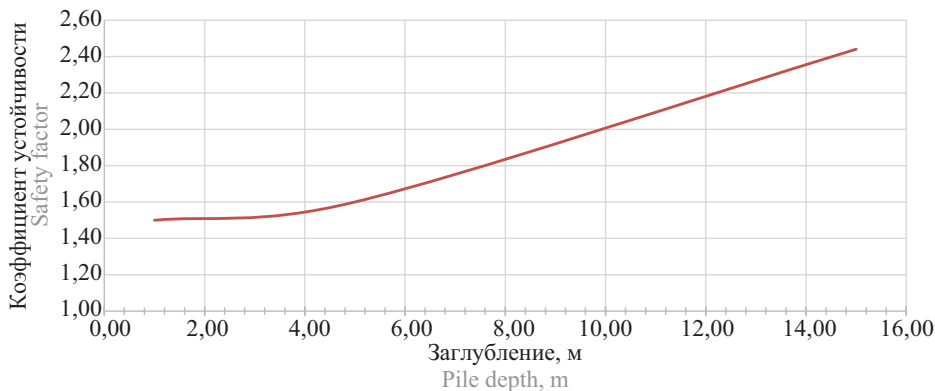


Рис. 11. График зависимости результата расчета коэффициента устойчивости в зависимости от заглубления

Fig. 11. Dependence between the resulting value of the stability factor and depth

в данном исследовании не рассматривались, но имеют место в мировой практике.

При различных размерах сооружения добиться значительных сдвиговых деформаций, представляющих собой сдвиг по вертикальной плоскости по оси сооружения, не удалось, что может быть

следствием сложности задания возможности скольжения в замковых соединениях.

При расчетах на численных моделях показано, что сооружения в виде ячеек из плоского шпунта работают как гравитационные сооружения, теряющие устойчивость преимущественно вследствие глубин-

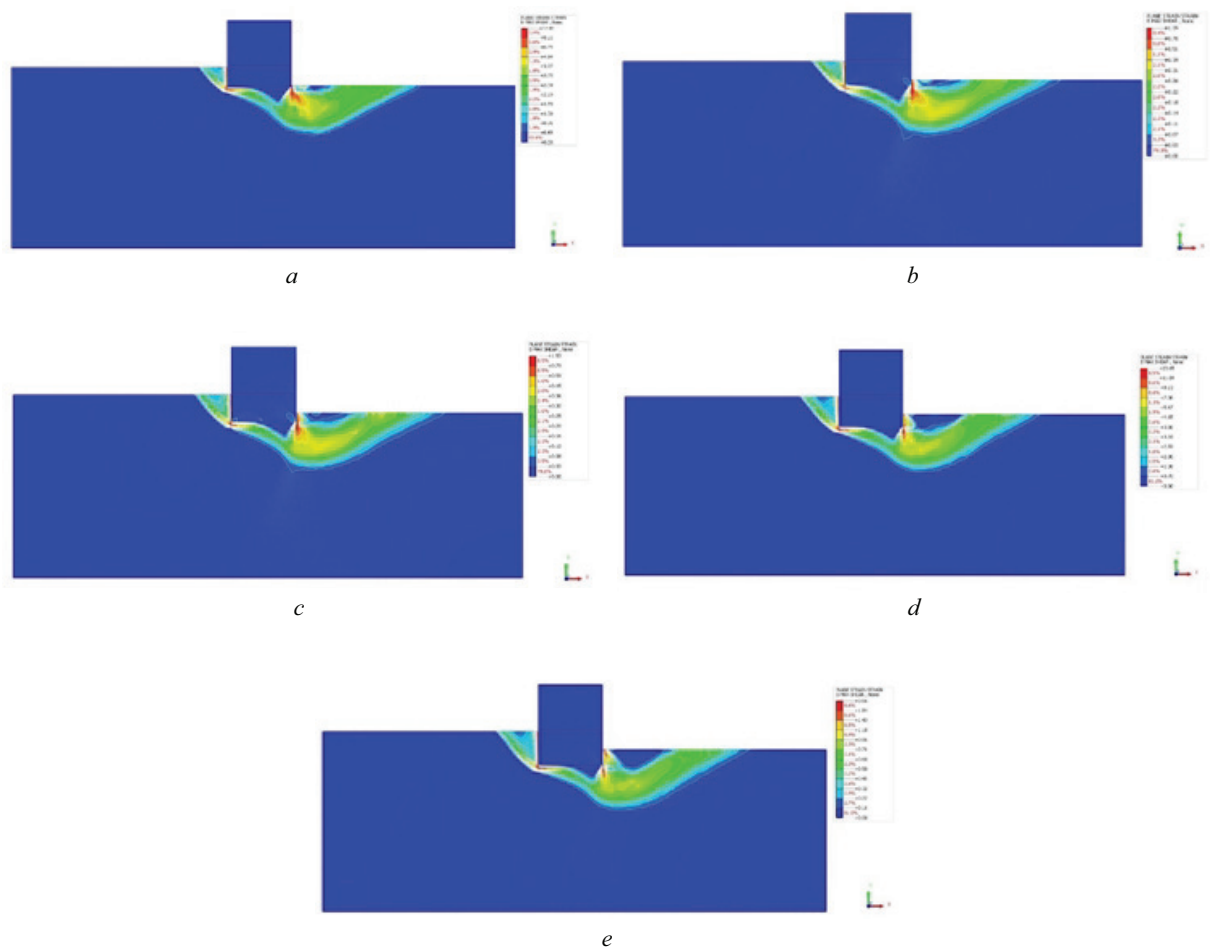


Рис. 12. Результат определения сдвиговых деформаций в двухмерной постановке с заглублением шпунта ниже отметки дна котлована при заглублении: *a* — 1 м; *b* — 2 м; *c* — 3 м; *d* — 4 м; *e* — 5 м

Fig. 12. Shear strain in the two-dimensional setting for a sheet pile driven below the excavation bottom for the following depth values: *a* — 1 m; *b* — 2 m; *c* — 3 m; *d* — 4 m; *e* — 5 m

ного сдвига. Формы поверхности обрушения в аналитических и численных расчетах довольно похожи, однако характерные размеры сдвигающегося тела и полученные коэффициенты устойчивости расходятся, что видно на рис. 14.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По графикам результатов аналитических расчетов можно сделать вывод, что наиболее влияющим на устойчивость сооружения фактором является диаметр ячеек. Однако с увеличением заглубления шпунта в основание коэффициенты по разным формам потери устойчивости, кроме расчета по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения, имеют нисходящую тенденцию.

Результаты расчета численных моделей показывают, что поверхность сдвига при потере устойчивости аналогична кривой, получаемой аналитическим методом расчета устойчивости по схеме глубинного сдвига, но расчетный коэффициент устойчивости по аналитическому методу значительно ниже.

Специфическим расчетом ячеистых конструкций из шпунта является расчет устойчивости на сдвиг по вертикальной плоскости, однако при численном моделировании не возникло предпосылок к данному сдвигу. Причиной тому может служить условность расчетной модели. Так как шпунт задается двумерными элементами в грунтовом массиве, задать возможность проскальзывания в замках проблематично, а сила трения в замках является одной из составляющих этого расчета.

Различия в результатах аналитических и численных расчетов в трехмерной постановке объясняются сложной работой сооружения. Ячеистые конструкции обеспечивают устойчивость одновременно и за счет собственного веса, как гравитационного сооружения, и за счет защемления в грунте. Но, поскольку ячейка представляет собой оболочку со свободными пятнами шпунтовых свай, в которой находится грунт, возникает сложное взаимодействие грунта снаружи и внутри ячейки, которое, если судить по полученным результатам, не описывается теорией предельного равновесия, как, например, грунтовое давление на тонкие стенки.

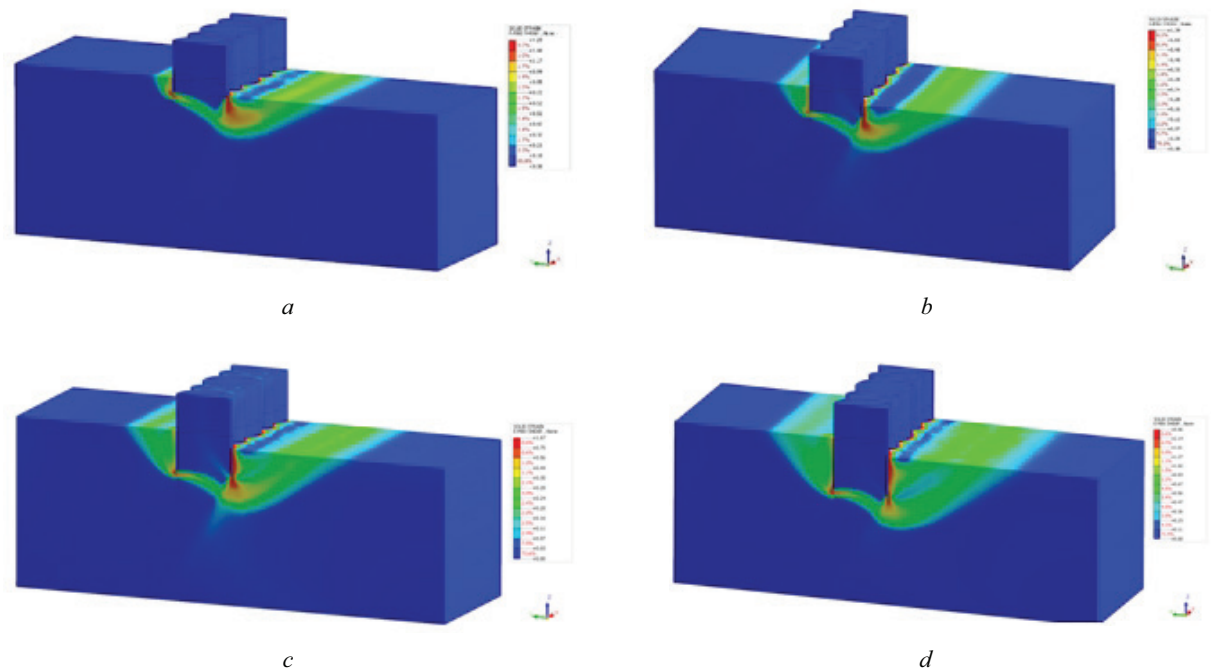


Рис. 13. Результат определения сдвиговых деформаций в трехмерной постановке с заглублением шпунта ниже отметки дна котлована: *a* — 1 м; *b* — 5 м; *c* — 10 м; *d* — 15 м

Fig. 13. Shear strain in the three-dimensional setting for a sheet pile driven below the excavation bottom for the following depth values: *a* — 1 m; *b* — 5 m; *c* — 10 m; *d* — 15 m

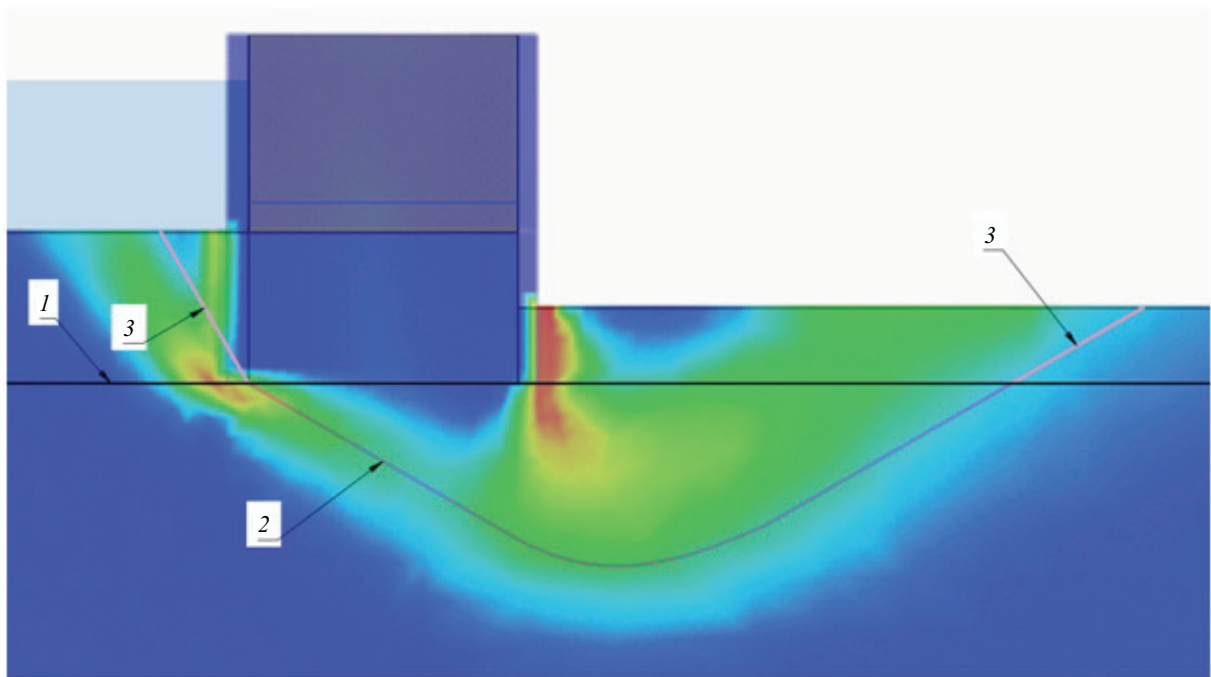


Рис. 14. Сопоставление полученных результатов расчета устойчивости по схеме глубинного сдвига: *1* — граница расчетной области при аналитическом расчете; *2* — положение поверхности сдвига, полученное аналитическим расчетом; *3* — предполагаемое продолжение поверхности сдвига

Fig. 14. Compared stability computations made using the deep-seated shear method: *1* — computational domain boundary for the analytical method; *2* — position of the shear surface determined analytically; *3* — anticipated continuation of the shear surface

Численное моделирование в двухмерной постановке задачи дает схожие результаты с аналитическим решением и значительно меньший запас устойчивости в сравнении с трехмерной задачей. Также из-за принятых допущений в виде жестких связей стенок между собой усилия в шпунте определить не представляется возможным.

Выведение более точной аналитической методики расчета ячеистых конструкций — сложная

задача, так как в работе сооружения участвует множество факторов от разных геологических условий до специфических нагрузок. При проектировании в первом приближении основные размеры сооружения допустимо принять при выполнении вышеописанных аналитических условий или численными расчетами в двухмерной постановке, после чего в дальнейшем необходимо уточнить результаты расчетами в трехмерной постановке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Smith T.W., Page M.J., Carchedi D.R.* Cellular pier rehabilitation design // *Ports* 2022. 2022. DOI: 10.1061/9780784484395.012
2. *Zhang Y., Li S., Li H., Li K., Han M.* Installation design of a large tubular caisson in the spatially varying seabed // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 246. P. 110626. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110626
3. *Liu R., Yuan Y., Fu D., Sun G.* Numerical investigation to the cyclic loading effect on capacities of the offshore embedded circular foundation in clay // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 119. P. 103022. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103022
4. *Wu Y., Li D., Yang Q., Zhang Y.* Resistance to skirt-tip with external bevels of suction caissons penetrating clay // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 249. P. 110909. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110909
5. *Song L., Zhao H., Li J., Yang Q.* Failure mode and mechanism of large cylinder structures for artificial islands on soft clay // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 119. P. 103032. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103032
6. *Xiao Z., Song L., Li J.* Stability of the large cylindrical structures in Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge: A case study // *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 97. P. 102092. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102092
7. *Dağlı B., Yiğit M.E., Gökkuş Ü.* Behaviour of large cylindrical offshore structures subjected to wave loads // *TEM Journal*. 2017. Vol. 6. Issue 3. Pp. 550–557. DOI: 10.18421/TEM63-16
8. *Xiao Z., Wang Y.Z., Ji C.N., Huang T.K., Shan X.* Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load // *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2010. Vol. 31. Issue 8. Pp. 2648–2654.
9. *Kim J., Jeong Y.J., Park M.S.* Structural behaviors of cylindrical cofferdam with plane and corrugated cross section under offshore conditions // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2017. Vol. 7. Issue 9. Pp. 334–340.
10. *Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S.* Structural analysis of offshore cofferdam subjected to wave load and suction pressure // *Open Journal of Civil Engineering*. 2018. Vol. 8. Issue 4. Pp. 555–569. DOI: 10.4236/ojce.2018.84040
11. *Kim J., Jeong Y.J., Park M.S., Song S.* Numerical investigation on buckling behavior of suction-installed cofferdam // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018. Vol. 7. Issue 11. DOI: 10.17577/IJERTV7IS110103
12. *Gahlot R., John R., Zemse R.* Cofferdams-forces analysis and design criteria // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014. Vol. 5. Issue 12.
13. *Ciammaichella M., Tantalla J.* Temporary cellular cofferdam design, installation and removal at Willow Island hydroelectric project // *Proceedings of HydroVision*. 2014. Pp. 2–7.
14. *Weinmann T., Nyren R., Marr W.A.* Exposure of deep foundations for the Kentucky lock addition project // *IFCEE* 2015. 2015. DOI: 10.1061/9780784479087.234
15. *Bittner R., Kirk N.* Cofferdam solution for steeply sloping rock using flat-sheet piles // *Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations*. 2014.
16. *Geotechnical design parameters for retaining walls, sound barrier walls and non-critical slopes // Staunton Materials Section, VDOT Staunton District. Virginia Department of Transportation*. 2013.
17. *Yazdani M., Azad A., Farshi A.H., Talatahari S.* Extended “Mononobe-Okabe” method for seismic design of retaining walls // *Journal of Applied Mathematics*. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2013/136132
18. *Warrick J.A., Bountry J.A., East A.E., Magirl C.S., Randle T.J., Gelfenbaum G. et al.* Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis // *Geomorphology*. 2015. Vol. 246. Pp. 729–750. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.010
19. *Tockner K., Zarfl C., Alex E., Berlekamp J., Tydecks L.* Future boom in hydropower dam construction will change the global map (Slides) // *17th International River symposium: Excellence Collaboration-Integration*. 2014. Pp. 1–8.
20. *Rose A.T.* Using the 1911 Austin dam failure case history in undergraduate teaching // *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013.
21. *Mohan R.* Review of environmental dredging in North America: current practice and lessons learned // *J. Dredging*. 2016. Vol. 15. Issue 2. P. 29.

22. Saba M.R., Abbas B., Al-Humairi B.A. Finite element model to study the deformation of circular cellular cofferdams by using ansys program // *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*. 2014. Vol. 22. Issue 1. Pp. 123–132.
23. Prassettyo S.H., Gutierrez M. Cellular cofferdams as permanent hydropower dam structures // 2018 U.S. Society on Dams Conference and Exhibition. 2018.

24. Al-Tae K.N., Al-Rammahi S.H. Stability analysis of cellular retaining structure by plaxis finite element code // *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*. 2018. Special Issue (D). Pp. 599–612.

25. Терихов Е.М., Анишаков А.С. Анализ методов расчета устойчивости ячеистых конструкций // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 7. С. 1104–1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1104-1113

Поступила в редакцию 1 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 21 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Егор Максимович Терихов** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ResearcherID: HTQ-6323-2023; terikhovegor@mail.ru;

Александр Сергеевич Анишаков — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 864818, Scopus: 57202806387, ResearcherID: ABA-6753-2020, ORCID: 0000-0002-0437-3109; anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

- Smith T.W., Page M.J., Carchedi D.R. Cellular pier rehabilitation design. *Ports* 2022. 2022. DOI: 10.1061/9780784484395.012
- Zhang Y., Li S., Li H., Li K., Han M. Installation design of a large tubular caisson in the spatially varying seabed. *Ocean Engineering*. 2022; 246:110626. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110626
- Liu R., Yuan Y., Fu D., Sun G. Numerical investigation to the cyclic loading effect on capacities of the offshore embedded circular foundation in clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103022. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103022
- Wu Y., Li D., Yang Q., Zhang Y. Resistance to skirt-tip with external bevels of suction caissons penetrating clay. *Ocean Engineering*. 2022; 249:110909. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110909
- Song L., Zhao H., Li J., Yang Q. Failure mode and mechanism of large cylinder structures for artificial islands on soft clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103032. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103032
- Xiao Z., Song L., Li J. Stability of the large cylindrical structures in Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge: A case study. *Applied Ocean Research*. 2020; 97:102092. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102092
- Dağlı B., Yiğit M.E., Gökkuş Ü. Behaviour of large cylindrical offshore structures subjected to Wave loads. *TEM Journal*. 2017; 6(3):550–557. DOI: 10.18421/TEM63-16
- Xiao Z., Wang Y.Z., Ji C.N., Huang T.K., Shan X. Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2010; 31(8):2648–2654.
- Kim J., Jeong Y.J., Park M.S. Structural behaviors of cylindrical cofferdam with plane and corrugated cross section under offshore conditions. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2017; 7(9):334–340.
- Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S. Structural analysis of offshore cofferdam subjected to wave load and suction pressure. *Open Journal of Civil Engineering*. 2018; 8(4):555–569. DOI: 10.4236/ojce.2018.84040
- Kim J., Jeong Y.J., Park M.S., Song S. Numerical investigation on buckling behavior of suction-installed cofferdam. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018; 7(11). DOI: 10.17577/IJERTV7IS110103
- Gahlot R., John R., Zemse R. Cofferdams-forces analysis and design criteria. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014; 5(12).
- Ciammaichella M., Tantalla J. Temporary cellular cofferdam design, installation and removal at Willow Island hydroelectric project. *Proceedings of HydroVision*. 2014; 2–7.
- Weinmann T., Nyren R., Marr W.A. Exposure of Deep Foundations for the Kentucky Lock Addition Project. *IFCEE 2015*. 2015. DOI: 10.1061/97807844-79087.234
- Bittner R., Kirk N. Cofferdam solution for steeply sloping rock using flat-sheet piles. *Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations*. 2014.
- Geotechnical design parameters for retaining walls, sound barrier walls and non-critical slopes. Staunton Materials Section, VDOT Staunton District. *Virginia Department of Transportation*. 2013

17. Yazdani M., Azad A., Farshi A.H., Talatahari S. Extended “Mononobe-Okabe” method for seismic design of retaining walls. *Journal of Applied Mathematics*. 2013; 2013:1-10. DOI: 10.1155/2013/136132
18. Warrick J.A., Bountry J.A., East A.E., Magirl C.S., Randle T.J., Gelfenbaum G. et al. Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis. *Geomorphology*. 2015; 246:729-750. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.010
19. Tockner K., Zarfl C., Alex E., Berlekamp J., Tydecks L. Future boom in hydropower dam construction will change the global map (Slides). *17th International River symposium: Excellence Collaboration-Integration*. 2014; 1-8.
20. Rose A.T. Using the 1911 Austin dam failure case history in undergraduate teaching. *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013.
21. Mohan R. Review of environmental dredging in North America: current practice and lessons learned. *J. Dredging*. 2016; 15(2):29.
22. Saba M.R., Abbas B., Al-Humairi B.A. Finite element model to study the deformation of circular cellular cofferdams by using ansys program. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*. 2014; 22(1):123-132.
23. Prasetyo S.H., Gutierrez M. Cellular cofferdams as permanent hydropower dam structures. *2018 U.S. Society on Dams Conference and Exhibition*. 2018.
24. Al-Tae K.N., Al-Rammahi S.H. Stability analysis of cellular retaining structure by PLAXIS finite element code. *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*. 2018; Special Issue (D):599-612.
25. Terikhov E.M., Anshakov A.S. Analysis of methods for calculating the stability of cellular structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(7):1104-1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7. 1104-1113 (rus.).

Received March 1, 2024.

Adopted in revised form on March 21, 2024.

Approved for publication on March 29, 2024.

B I O N O T E S : **Egor M. Terikhov** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ResearcherID: HTQ-6323-2023; terikhovegor@mail.ru;

Aleksandr S. Anshakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 864818, Scopus: 57202806387, ResearcherID: ABA-6753-2020, ORCID: 0000-0002-0437-3109; anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Теплозвуковая аналогия для исследования теплозвукофизических свойств твердых материалов

Владимир Михайлович Фокин, Андрей Васильевич Ковылин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается метод теплозвуковой аналогии, с помощью которого определяются теплозвукофизические свойства твердых строительных материалов. Приведено математическое исследование, которое позволило выявить параметры, зависимости и критерии, характерные для процесса распространения температурных и звуковых волн в твердых материалах, и вывести новый физический смысл температуропроводности. Математический эксперимент подтвержден проведенным экспериментальным исследованием на образце из фторопласта.

Материалы и методы. Разработанная авторами методика определения комплекса теплозвукофизических свойств твердых материалов базируется на теплозвуковой аналогии. Температурные и звуковые колебания (волны) распространяются в твердом теле по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях, что дает возможность провести экспериментальное исследование, основанное на измерении температуры и плотности теплового потока на поверхности образца.

Результаты. На основании проведенного эксперимента на исследуемом образце получены экспериментальные данные по температурам и тепловому потоку, что позволило, используя разработанную авторами методику, рассчитать теплозвукофизические свойства материала: теплопроводность, объемную теплоемкость, температуропроводность, поверхностную скорость температурной волны, а также акустическую скорость звука в материале. Математический эксперимент по теплозвуковой аналогии дал возможность установить закон температурной волны. Выведенное правило температурной волны позволило сформулировать новый физический смысл температуропроводности вещества.

Выводы. Полученные экспериментальным путем теплозвукофизические свойства материала согласуются с данными, приведенными в справочной и технической литературе, расхождение не превышает 5 %, что подтверждает проведенный математический эксперимент. Теплозвуковая аналогия позволяет определять не только температуропроводность, но и скорость звука в материалах по температурным и тепловым измерениям на поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплозвуковая аналогия, теплозвукофизические свойства, теплопроводность, температуропроводность, акустическая скорость звука, звуковые волны, температурные волны, строительные материалы

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фокин В.М., Ковылин А.В. Теплозвуковая аналогия для исследования теплозвукофизических свойств твердых материалов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1151–1160. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1151-1160

Автор, ответственный за переписку: Андрей Васильевич Ковылин, kovylin.andrei@mail.ru.

Thermal and acoustic analogy for the study of thermal acoustic physical properties of solid materials

Vladimir M. Fokin, Andrey V. Kovylin

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the method of thermal and acoustic analogy, used to determine thermal and acoustic properties of solid building materials. A mathematical study is provided, which enables identifying parameters, dependencies and criteria characteristic of the propagation of temperature and sound waves in solid materials and to derive a new physical meaning of thermal conductivity. The mathematical experiment is confirmed by the experimental study conducted using a fluoroplastic specimen.

Materials and methods. The method developed by the authors for determining a set of thermal and acoustic properties of solid materials is based on thermal and acoustic analogy. Temperature and sound vibrations (waves) propagate in a solid body according to the cosine law and are easily reproduced in laboratory conditions, which made it possible to conduct an experimental study by measuring the temperature and density of a heat flux on the surface of a specimen.

Results. Experimental data on temperature and heat flow were obtained from the experiment conducted using the specimen under study, which made it possible, using the methodology developed by the authors, to identify thermal and acoustic properties of the material, including thermal conductivity, volumetric heat capacity, thermometric conductivity, surface velocity of temperature waves, as well as the acoustic velocity of sound in the material. In addition, the mathematical experiment

on thermal and acoustic analogy allowed the authors to establish the law of a temperature wave. Moreover, this law enabled formulating a new physical meaning of thermal conductivity of a substance.

Conclusions. Experimentally identified thermal and acoustic properties of the material are consistent with the data provided in the reference and engineering literature, the discrepancy does not exceed 5 %, which confirms the validity of the mathematical experiment. Thermal and acoustic analogy makes it possible to determine not only the thermal conductivity, but also the speed of sound in materials by temperature and heat measurements taken on the surface.

KEYWORDS: thermal and acoustic analogy, thermal and acoustic physical properties, heat conductivity, thermometric conductivity, acoustic speed of sound, sonic waves, temperature waves, building materials

Acknowledgment. The authors would like to thank the anonymous reviewers.

FOR CITATION: Fokin V.M., Kovylin A.V. Thermal and acoustic analogy for the study of thermal acoustic physical properties of solid materials. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1151-1160. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1151-1160 (rus.).

Corresponding author: Andrey V. Kovylin, kovylin.andrei@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Комфортные условия для человека в жилых и общественных зданиях и помещениях достигаются путем обеспечения температурно-влажностного режима, а также шумоизоляцией. Для этого используют различные строительные, тепло- и звукоизолирующие материалы. Оценка эффективности ограждений зданий и помещений зависит от знания теплофизических и звукофизических свойств материалов. Для исследования теплозвукофизических свойств твердых строительных материалов авторами разработан новый метод, его отличием от существующих является то, что он позволяет определять не только теплофизические, но и звукофизические свойства твердых материалов за одно экспериментальное исследование методом теплозвуковой аналогии. Разработанная методика определения комплекса теплозвукофизических свойств твердых материалов с помощью неразрушающего метода испытаний основана на измерении температуры и плотности теплового потока на поверхности образца.

Разработка нового метода выявления теплозвукофизических свойств твердых материалов базируется на принципах теплозвуковой аналогии, а также физико-математической модели температурных полей. Авторами статьи разработан новый метод определения теплозвукофизических свойств твердых материалов, на который получены патенты на изобретения, в его основе — измерение температур и плотности теплового потока на поверхности образца методом неразрушающих испытаний [1].

Для экспериментального исследования выбран образец твердого материала — фторопласт, с известными теплозвукофизическими свойствами, приведенными в справочной и технической литературе [2, 3]. Исследование различных материалов неразрушающим методом испытаний, а также изучение разных методов определения теплофизических свойств материалов рассматривалось отечественными и зарубежными авторами [4–19]. Теоретические основы по определению звукофизических свойств приведены в работе [20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Температурные и звуковые колебания (волны) распространяются в твердом теле по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях. Для проведения математического эксперимента рассмотрим однородную, изотропную плоскую пластину, для которой физические свойства постоянны и не зависят от температуры и влажности, деформации внутри объема (в связи с температурными напряжениями) незначительны по сравнению с объемом, а макрочастицы внутри объема неподвижны относительно друг друга.

Если пластина определенных размеров, толщиной δ , с начальной температурой T_0 подвергается интенсивному нагреву любым тепловым потоком со стороны одной наружной поверхности ($x = 0$) до температуры T_c и поддерживается неизменной на протяжении всего времени релаксации, то процесс переноса теплоты в пластине имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

с условиями однозначности (начальные и граничные):

$$T_{\tau=0} = T_0; \quad T_{x=0} = T_c.$$

Для решения уравнения (1) воспользуемся избыточными температурами:

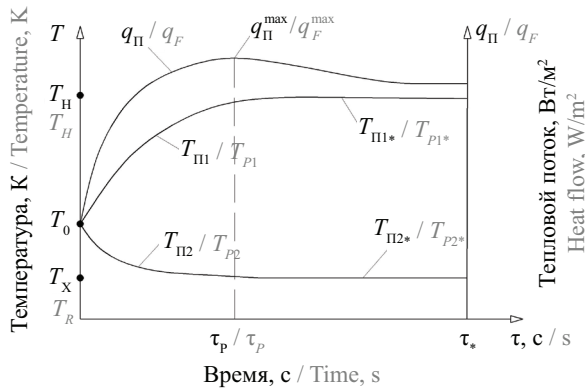
$$\vartheta = (T_c - T) \text{ и } \vartheta_0 = (T_c - T_0).$$

Тогда уравнение (1) для пластины примет вид:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}.$$

Распределение температур и теплового потока в пластине по времени нагрева приведено на рисунке [20].

В результате интенсивного теплового воздействия на наружную поверхность в пластине по толщине образовывается тепловая волна, и, как любая волна (воды, воздуха в природе), она перемещается от поверхности нагрева по всему объему вещества, но само вещество остается на месте. Кроме того, тепловая или температурная волна в зависимости



Распределение температур и теплового потока в пластине: T_0 — начальная температура пластины; T_H — температура нагревателя; T_X — температура холодильника; T_{P1} — температура пластины со стороны нагревателя; T_{P2} — температура пластины со стороны холодильника; T_{P1*} — температура поверхности пластины со стороны нагревателя в стационарном режиме; T_{P2*} — температура поверхности пластины со стороны холодильника в стационарном режиме; q_{P1} — тепловой поток на поверхности пластины со стороны нагревателя; q_{P1}^{max} — максимальный тепловой поток на поверхности пластины; τ_p — время наступления упорядоченного теплового режима или достижения максимального теплового потока; τ_* — время наступления стационарного теплового режима в пластине

Distribution of temperatures and heat flow in the plate: T_0 is the initial temperature of the plate; T_H is the temperature of the heater; T_X is the temperature of the refrigerator; T_{P1} is the plate temperature on the heater side; T_{P2} is the plate temperature on the refrigerator side; T_{P1*} is the plate surface temperature on the heater side in the steady mode; T_{P2*} is the temperature of the plate surface in the steady mode on the refrigerator side; q_{P1} is the heat flow on the surface of the plate on the heater side; q_{P1}^{max} is the maximum heat flow on the plate surface; τ_p is the time of the onset of the normalized thermal mode or the achievement of maximum heat flow; τ_* is the time of the onset of the steady thermal mode in the plate

от толщины пластины δ и времени τ станет затухающей с определенной долей проникновения (или поглощения). Распределение температур в пластине по толщине осуществляется в зависимости от способа нагрева или охлаждения, а именно от начального режима и до упорядоченного или стационарного теплового режима.

По истечении некоторого отрезка времени τ_p от начала процесса нагрева, который называется начальным периодом (описывается сложными математическими уравнениями), внешнее тепловое воздействие затронет в какой-то мере центральные участки объема пластины и наступит упорядоченный тепловой режим. Интенсивность теплоты или плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева в этот момент времени (τ_p) достигнет максимума q_{P1}^{max} , а затем на всем

протяжении дальнейшего процесса нагрева останется либо постоянной, либо с определенным темпом, незначительно изменяясь, снижается, в зависимости от граничных условий охлаждения пластины на поверхности со стороны охлаждения T_{P2} .

Температура на поверхности пластины T_{P1} со стороны нагрева в течение времени изменяется по экспоненциальному закону от начальной температуры T_0 , проходит стадию упорядоченного теплового режима и выходит на стационарный тепловой режим T_{P1*} .

Температура на поверхности пластины T_{P2} со стороны охлаждения изменяется от начальной температуры T_0 , а затем в течение времени выходит на стационарный тепловой режим T_{P2*} .

Начальный период нагрева (охлаждения) заканчивается, когда плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева станет максимальной и наступит упорядоченный тепловой режим, который в течение времени переходит либо в стационарный тепловой режим, либо в термодинамическое равновесие, в зависимости от граничных условий и экспериментальной установки или метода его осуществления. В начальный период нагрева (до τ_p) часть тепловой энергии затрачивается на аккумуляцию тела.

При несимметричном нагреве пластины по истечении времени упорядоченный тепловой режим вписывается в стационарную стадию. Время от наступления упорядоченного теплового режима (τ_p) до времени наступления стационарного теплового режима (τ_*) определяет только половину времени полного периода гармонического колебания температурной волны, а вторая половина времени условно отводится на охлаждение пластины. Поэтому обосновано считать, что частота колебаний температурной полу волны ν зависит от промежутка времени τ_* и составит $\nu = 1/\tau_*$, а частота гармонических колебаний полной температурной волны составит $\nu = 1/2\tau_*$.

В процессе распространения теплоты образует волна, которая выравнивает температуры на поверхности пластины и в теле по определенным законам. В стационарном тепловом режиме распределение температур в теле по толщине осуществляется по закону Фурье: $q = -\lambda(\partial\theta_{x,\tau}/\partial x)$.

В стадии наступления стационарного теплового режима в пластине (время τ_*) число Фурье вычисляется по формуле $Fo = (a \cdot \tau_*)/\delta^2$, разность температур вычисляется по выражению: $\Delta T_* = T_H - T_X$ или $\Delta T_* = T_{P1*} - T_{P2*}$, а тепловой поток в пластине имеет вид:

$$q_{пл}^* = \lambda(\Delta T_*/\delta) = (\lambda/\delta) \cdot (T_H - T_X) = (\lambda/\delta) \cdot (T_{P1*} - T_{P2*}).$$

Если в период наступления стационарной стадии нагрева τ_* известна плотность теплового потока $q_{пл}^*$ на поверхности, толщина пластины δ и перепад

температур по толщине ΔT_* , то коэффициент теплопроводности равен:

$$\lambda = ((q_{\text{пл}}^* \cdot \delta) / \Delta T_* = (q_{\text{пл}}^* \cdot \delta) / (T_{\text{н}} - T_{\text{х}})) = (q_{\text{пл}}^* \cdot \delta) / (T_{\text{пл}*} - T_{\text{пл}2*}).$$

Известно, что коэффициент теплопроводности, температуропроводность, объемная теплоемкость, весовая (массовая) теплоемкость и плотность материала связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} a &= \lambda / (c\rho), \text{ м}^2/\text{с}; \\ \lambda &= a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \\ (c\rho) &= \lambda / a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}); \\ c &= (c\rho) / \rho, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Следует отметить, что дифференциальное уравнение теплопроводности (1) и волновое уравнение для плоской акустической волны, как и частное решение волнового уравнения, имеют один вид.

В пластине (см. рис.) максимальная амплитуда колебаний температурной волны на поверхности со стороны нагрева определяется в упорядоченном или в стационарном тепловом режиме по формуле:

$$\vartheta_{\text{пл}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{пл}} - T_0) = 0,5(T_{\text{пл}*} - T_0).$$

Угловая (круговая) частота колебаний температурной волны ω_{T} и акустической волны $\omega_{\text{А}}$ в пластине равна:

$$\omega_{\text{T}} = 2\pi/z, 1/\text{с}; \omega_{\text{А}} = 2\pi f, 1/\text{с},$$

где z — полный период колебания температурной волны, с; f — частота звуковых колебаний, с⁻¹.

Также очевидно, что в пластине (см. рис.) время подъема температурной полуволны τ_* в процессе нагрева до упорядоченного или стационарного теплового режима и время предполагаемого спада температурной полуволны в процессе охлаждения будут показывать только половину от времени полного периода колебаний температурной волны, а именно: $z = 2\tau_*$.

Тогда угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в пластине при упорядоченном и стационарном тепловом режиме будет иметь вид:

$$\omega_{\text{T}}^{\text{пл}} = 2\pi/z = 2\pi/2\tau_* = \pi/\tau_*, 1/\text{с}, \quad (2)$$

где τ_* — время цикла за сутки (86 400 с).

Волновое число k для температурной волны k_{T} и звуковой (акустической) волны $k_{\text{А}}$ соответственно равны:

$$k_{\text{T}} = \sqrt{\omega_{\text{T}}/2a}, \text{ м}^{-1}; \quad (3)$$

$$k_{\text{А}} = \omega_{\text{А}}/C_{\text{А}}, \text{ м}^{-1},$$

где a — температуропроводность материала, м²/с; $C_{\text{А}}$ — скорость звука в материале, м/с.

Тогда волновое число для пластины в упорядоченном тепловом режиме и в момент наступления

стационарного теплового режима τ_* , согласно выражениям (2) и (3), равно:

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_*)}, \text{ м}^{-1}. \quad (4)$$

Следовательно, если будет известно волновое число в пластине $k_{\text{T}}^{\text{пл}}$, то полученное уравнение (4) позволяет определить температуропроводность пластины в момент наступления стационарного теплового режима τ_* , либо время наступления стационарного теплового режима в пластине, а именно:

$$a = \pi/[2\tau_*(k_{\text{T}}^{\text{пл}})^2], \text{ м}^2/\text{с}.$$

Косинусоида температурной волны в пластине в стадии упорядоченного или стационарного теплового режима (при $\tau = \tau_*$) стремится к единице:

$$\cos(\omega\tau - kx) = 1,$$

а уравнение для температурной волны имеет вид:

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\text{пл}}^{\text{max}} \cdot e^{-k_{\text{T}}x}. \quad (5)$$

Для звуковой волны звуковое давление в материале $P_{x,\tau}$ также зависит от звукового давления на поверхности P_m^{max} и имеет вид:

$$P_{x,\tau} = P_m^{\text{max}} \cdot e^{-k_{\text{А}}x}. \quad (6)$$

Звуковое давление P — это сила в ньютонах (Н), действующая на единицу поверхности (м²) и имеющая размерность — Н/м². Эта единица называется Паскаль (Па), а звуковое давление $P = 1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па} = 1 \text{ кгс}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$. Звуковое давление в паскалях в 1000 раз меньше атмосферного давления и не превышает 20–100 Па.

Полученные уравнения температурной волны (5) и звуковой волны (6) позволяют определить глубину и долю проникновения температурных и звуковых волн в твердых материалах.

Отметим, что еще в 1729 г. Пьер Бугер в законе затухания плоских волн (закон П. Бугера) установил, что линейный коэффициент половинного поглощения волн $kx = 0,69$, что подтверждает проведенный математический и физический эксперимент. Так же проведенный математический эксперимент по установлению доли проникновения температурных и звуковых волн определяет методику расчета волнового числа в пластине при любой доле проникновения гармонических колебаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное исследование теплофизических, звукофизических свойств проводилось на твердом материале из фторопласта. Авторами выполнено множество серий экспериментальных исследований. Приведем полученные экспериментальные данные и методику с расчетом теплофизических и звукофизических свойств исследуемого материала.

Начальная температура образца $T_0 = 23,0 \text{ }^\circ\text{C}$; толщина образца $\delta = 0,020 \text{ м}$; температура поверхности образца со стороны нагревателя $T_{\text{пл}} = 35,0 \text{ }^\circ\text{C}$;

температура поверхности образца со стороны холодильника $T_{п2} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; плотность теплового потока при доле проникновения температурной волны, равной значению 0,25 $q_{п} = 150\text{ Вт/м}^2$; время наступления стационарного теплового режима $\tau_p = 2520\text{ с}$.

Амплитуда колебаний температурной полуволны вычисляется по формуле и численно равна:

$$\vartheta_{п} = 0,5(T_{п1} - T_{п2}) = 0,5(35 - 20) = 7,5, \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $T_{п1}$ — температура поверхности образца со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п2}$ — температура поверхности образца со стороны холодильника в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоусвоения вычисляется по формуле и численно равен:

$$B = q_{п} / \vartheta_{п} = 150 / 7,5 = 20,0\text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $q_{п}$ — плотность теплового потока со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, Вт/м^2 ; $\vartheta_{п}$ — амплитуда колебаний температурной полуволны, $^{\circ}\text{C}$.

Термическое сопротивление вычисляется по формуле и численно равно:

$$R = \frac{T_{п1} - T_{п2}}{q_{п}} = \frac{35 - 20}{150} = 0,10 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт},$$

где $T_{п1}$ — температура поверхности образца со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п2}$ — температура поверхности образца со стороны холодильника в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$.

Доля проникновения температурной волны рассчитывается по формуле и численно равна:

$$\theta_T = \frac{T_0 - T_{п2}}{T_{п1} - T_0} = \frac{23 - 20}{35 - 23} = 0,25,$$

где T_0 — начальная температура поверхности образца, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п1}$ — температура поверхности образца со стороны нагревателя в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$; $T_{п2}$ — температура поверхности образца со стороны холодильника в момент времени наступления стационарного теплового режима, $^{\circ}\text{C}$.

Волновое температурное число определяется в момент времени наступления стационарного теплового режима и вычисляется по формуле и численно равно:

$$k_T^{\text{пл}} = H / \delta = 1,414 / 0,02 = 70,7, \text{ м}^{-1},$$

где H — безразмерное волновое число, определяемое расчетным путем при доле проникновения температурной волны 0,243–0,25, равное соответственно 1,39–1,414; δ — толщина образца, м.

Коэффициент теплопроводности вычисляется по формуле и численно равен:

$$\lambda = B / (H \cdot k_T^{\text{пл}}) = 20 / (1,414 \cdot 70,7) = 0,20, \text{ Вт/}(\text{м} \cdot \text{К}),$$

где B — коэффициент теплоусвоения, $\text{Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; H — безразмерное волновое число, определяемое расчетным путем в момент наступления стационарного теплового режима; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима.

Объемная теплоемкость вычисляется по формуле и численно равна:

$$(c\rho) = B^2 \cdot \tau / (\pi \cdot \lambda) = (20^2 \cdot 2520) / (3,14 \cdot 0,2) = 1610 \cdot 10^3, \text{ Дж/}(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где B — коэффициент теплоусвоения, $\text{Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; τ — время наступления стационарного теплового режима, определяемое по графику, с; π — математическая константа; λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/}(\text{м} \cdot \text{К})$.

Тепловая инерция вычисляется по формуле и численно равна:

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,2 \cdot (1610 \cdot 10^3) = 0,322 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2),$$

где λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/}(\text{м} \cdot \text{К})$; $(c\rho)$ — объемная теплоемкость, $\text{Дж/}(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Тепловая активность вычисляется по формуле и численно равна:

$$b_* = \sqrt{b} = \sqrt{0,322 \cdot 10^6} = 0,567 \cdot 10^3, \text{ Дж/}(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где b — тепловая инерция, $\text{Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2)$.

Далее рассчитываем теплофизический параметр: термopроводность — это безразмерный коэффициент, который характеризует долю отношения прошедшей через образец энергии температурной волны (Дж) к энергии, подведенной к образцу, определяемый по формуле.

Термopроводность вычисляется по формуле и численно равна:

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,434 \cdot k_T^{\text{пл}} \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot 70,7 \cdot 0,02} = 0,243,$$

где 0,434 — математическая константа; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца в виде пластины, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима, м^{-1} ; δ — толщина образца, м.

Термоизоляция вычисляется по формуле и численно равна:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{\text{пл}} \cdot \delta) = 4,34 (70,7 \cdot 0,02) = 6,14, \text{ дБ}, \quad (7)$$

где 4,34 — математическая константа; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число образца в виде пластины, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима, м^{-1} ; δ — толщина образца, м.

Из соотношения (7) можно определить, что термоизоляция более эффективна при большей толщине пластины, меньшем коэффициенте теплопроводности вещества, меньшем времени установления в пластине стационарного теплового режима.

Теплопроводность вычисляется по формуле и численно равна:

$$a = \pi / [2\tau(k_T^{\text{пл}})^2] = 3,14/2 \cdot 2520 \cdot (70,7)^2 = 0,125 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где π — математическая константа; τ — время наступления стационарного теплового режима, определяемое по графику, с; $k_T^{\text{пл}}$ — волновое температурное число, вычисленное в момент времени наступления стационарного теплового режима, м^{-1} .

Далее определим поверхностную скорость плоской температурной волны $S_{\text{п}}$. Она измеряется в м/с и характеризует распределение температурной волны от наружной поверхности пластины со стороны нагревателя до холодильника при поверхностной плотности условной пластины $\rho_{\text{п}}$ ($\text{кг}/\text{м}^2$), т.е. при соответствующей толщине пластины δ , м. Прилагаемое «плоская» температурная волна означает рассмотрение температурных и тепловых процессов в плоской системе координат (в пластине) ввиду наличия цилиндрических и шаровых волн.

Следовательно: *поверхностная скорость плоской температурной волны в пластине $S_{\text{п}}$* численно равна отношению пути δ , пройденного температурной волной, за время τ_* (с), до момента наступления стационарного теплового режима. Поверхностная скорость плоской температурной волны численно пропорциональна теплопроводности a материала и равна: $S_{\text{п}} = a/\delta$.

Установлено, что аналогично ведет себя и поверхностная плотность $\rho_{\text{п}}$, которая определяется по формуле: $\rho_{\text{п}} = \rho \cdot \delta$, которая при толщине пластины $\delta = 1$ м численно равна удельной плотности ρ . Так как поверхностная плотность $\rho_{\text{п}}$ пропорциональна толщине пластины δ , то устанавливается соотношение или правило для температурной волны.

Математический эксперимент по тепловзвучивой аналогии позволяет установить *закон температурной волны*: квадрат поверхностной скорости плоской температурной волны $S_{\text{п}}$, м/с, проходящей через пластину прямо, пропорционален термическому напряжению на поверхности $\psi_{\text{п}}$, Па·м, и обратно пропорционален поверхностной плотности изделия $\rho_{\text{п}}$, $\text{кг}/\text{м}^2$:

$$S_{\text{п}}^2 = \Phi_{\text{К}} (\psi_{\text{п}}/\rho_{\text{п}}).$$

Правило температурной волны: поверхностная скорость плоской температурной волны $S_{\text{п}}$, проходящей через плоское твердое тело, уменьшается пропорционально увеличению поверхностной плотности вещества, а при численном равенстве удельной и поверхностной плотности (т.е. при толщине пластины $\delta = 1$ м) поверхностная скорость пло-

ской температурной волны $S_{\text{п}}^*$, м/с, соответственно при $\delta = 1$ м численно пропорциональна теплопроводности вещества a ($\text{м}^2/\text{с}$), т.е. устанавливается соотношение:

$$S_{\text{п}}^* = a \text{ при } \delta = 1 \text{ м.}$$

Из формулировки правила температурной волны вытекает новый *физический смысл теплопроводности* вещества (материала): теплопроводность a , $\text{м}^2/\text{с}$, характеризует поверхностную скорость плоской температурной волны $S_{\text{п}}^*$, м/с, на глубине (толщине пластины, изделия) $\delta = 1$ м в момент наступления стационарного теплового режима τ_* .

Поверхностная скорость температурной волны вычисляется по формуле и численно равна:

$$S_{\text{п}} = a/\delta = 0,125 \cdot 10^{-6}/0,02 = 6,25 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с},$$

где a — теплопроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; δ — толщина образца, м.

Далее рассчитываем термическое напряжение $\psi_{\text{п}}$, которое возникает в любой точке среды объема материала пластины за счет нагрева или воздействия теплового потока любой интенсивности при прохождении температурной волны и представляет собой тепловое давление, действующее на единицу глубины по толщине пластины. Термическое напряжение обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины.

Термическое напряжение на поверхности образца вычисляется по формуле и численно равно:

$$\psi_{\text{п}}^{\text{пл}} = 2/R = 2/0,1 = 20,0, \text{ Па} \cdot \text{м},$$

где R — термическое сопротивление, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Получившаяся размерность термического напряжения в Па·м объясняется следующим. Для условий стационарного теплового режима при прохождении теплоты $Q = 1$ Дж в единицу времени $\tau = 1$ с через объем вещества $V = 1 \text{ м}^3$ возникает температурная волна с амплитудой $\theta = 1$ °С, что подтверждается термодинамическим законом (Менделеева — Клапейрона) и законом сохранения энергии, а именно в данном случае переходе части тепловой энергии Q в механическую энергию в виде теплового давления, т.е. по существу и по размерности выполняется условие:

$$1 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К}) = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) = 1 \text{ Па или Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = (\text{Па} \cdot \text{м}).$$

Безразмерное число волновой скорости рассчитывают по формуле:

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\text{п}}^2 (\rho_{\text{п}}/\psi_{\text{п}}^{\text{пл}}) = (6,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (44/20) = 0,0859 \cdot 10^{-9},$$

где $S_{\text{п}}$ — поверхностная скорость температурной волны, м/с; $\rho_{\text{п}}$ — поверхностная плотность, $\text{кг}/\text{м}^2$; $\psi_{\text{п}}^{\text{пл}}$ — термическое напряжение на поверхности, Па·м.

Теплозвукофизические свойства фторопласта
Thermal and acoustic physical properties of fluoroplast

Параметр Characteristic	Экспериментальные значения Experimental values	Справочные значения Reference values
Теплопроводность λ , Вт/(м·К) Heat conductivity λ , W/(m·K)	0,20	0,19–0,22
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м³·К) Volumetric heat capacity c_p , KJ/(m³·K)	1610	1500–1700
Температуропроводность $a \cdot 10^6$, м²/с Thermal conductivity $a \cdot 10^6$, m²/s	0,125	0,1–0,135
Звуковая (акустическая) скорость, м/с Sound (acoustic) speed, m/s	1455	1400–1500

Скорость распространения звука в твердом материале вычисляется по формуле и численно равна:

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_K = 0,125 \cdot 10^{-6} / 0,0859 \cdot 10^{-9} = 1455 \text{ м/с},$$

где S_{Π}^* — поверхностная скорость температурной волны на глубине 1 м численно пропорциональна температуропроводности (a) материала, м/с; Φ_K — безразмерное число волновой скорости.

Для наглядности в таблице приведено сравнение некоторых экспериментальных и справочных данных фторопласта.

Анализируя приведенные в таблице экспериментальные и справочные значения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности, акустической скорости для фторопласта, можно сказать, что расхождение между ними составляет не более 5 %, что говорит о надежности разработанного нового метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный новый метод определения теплофизических и звукофизических свойств твердых материалов позволяет установить теплозвукофизические свойства твердого строительного материала за одно экспериментальное исследование. Теплозвуковая аналогия и проведенный математический эксперимент дали возможность определить коэффициент теплопроводности. Выявлено, что коэффициент теплопроводности α_{TERM} становится меньше и, следова-

тельно, более эффективней с увеличением толщины δ , уменьшением температуропроводности вещества a , уменьшением времени установления стационарного теплового режима τ_* . С уменьшением коэффициента теплопроводности α_{TERM} термоизоляция R_{TERM} увеличивается и будет считаться более энергоэффективной (например, в процессе производства термоизоляции) или менее энергоэффективной (в процессе эксплуатации).

Также теплозвуковая аналогия и математический эксперимент позволили определить термоизоляцию R_{TERM} , которая более эффективна при большей толщине пластины δ , меньшем коэффициенте температуропроводности вещества a , меньшем времени установления в пластине стационарного теплового режима.

Разработанная авторами методика определения волнового числа позволяет определять его при любой доле проникновения гармонических колебаний, что имеет огромное практическое значение для экспериментальных исследований. Кроме того, проведенный математический эксперимент по установлению доли проникновения температурных и звуковых волн определяет методику расчета волнового числа в пластине при любой доле проникновения гармонических колебаний.

Из правила температурной волны впервые сформулирован новый физический смысл коэффициента температуропроводности материала.

Полученные экспериментальные данные теплозвукофизических свойств фторопласта сравнивались со справочными значениями, расхождение составляет не более 5 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент RU № 2767468 C1, МПК G01N 25/18, G01N 3/54. Способ определения комплекса теплозвукофизических и механических характеристик твердых материалов / Фокин В.М., Ковылин А.В.; патентообл. Ковылин А.В.; заявл. № 2023104914 от 01.03.2023; опубл. 01.08.2023. Бюл. № 22.

2. Дмитривич А.Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов. М. : Госстройиздат, 1963.

3. Иофе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А. Справочник по акустике. М. : Связь, 1979. 312 с.

4. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexandrovich P.A., Sergeevna S.E. Automated portable installation to determine the thermo physical properties of the object // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019. Vol. 16. Issue 7. Pp. 3115–2120. DOI: 10.1166/jctn.2019.8228

5. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexan-

drovich P.A., Sergeevna S.E. Measuring the thermo physical properties of construction projects // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019. Vol. 16. Issue 7. Pp. 3121–3127. DOI: 10.1166/jctn.2019.8229

6. Shaimerdenova K.M. Investigation of the thermophysical characteristics of minerals at various heating parameters // Eurasian Physical Technical Journal. 2021. Vol. 18. Issue 1. Pp. 70–74. DOI: 10.31489/2021no1/70-74

7. Mikailsoy F.D. On the influence of boundary conditions in modeling heat transfer in soil // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. Issue 7. Pp. 67–79. DOI: 10.1007/s10891-017-1540-y

8. Yakushkin I.P. Development of a module to measure losses through building envelopes for the smart energy-saving ventilation automatic control system // International Journal of Control Theory and Applications. 2016. Vol. 9. Issue 30. Pp. 1–7.

9. Kuznetsov G.V., Katz M.D. Analysis of conditions for determining the thermophysical characteristics of energetic materials by the laser pulse method // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2016. Vol. 10. Issue 6. Pp. 978–982. DOI: 10.1134/s1990793116060051

10. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A. Thermophysical properties of Kachkanar titanomagnetite pellets // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. Issue 5. Pp. 329–333. DOI: 10.3103/s0967091216050168

11. Dzhuraev D.S., Safarov M.M. Studies of thermophysical properties of ferrofluids // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. Issue 7. Pp. 743–746. DOI: 10.1007/s11018-016-1040-z

12. Shchukina T.V., Sheps R.F., Burak E.E. Energy-saving regimes examination during new generation building structures insulation: international multi-conference on industrial engineering and modern technologies electronic edition // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022072. DOI: 10.1088/1757-899x/463/2/022072

13. Kryuchkov O.B., Malenko P.I., Konovalov S.S., Kostygova O.V. The study of the influence of the initial furnace temperature on the temperature drop across the section of a billet using physical modeling // Черные металлы. 2018. № 12. С. 34–40. EDN OFJHLU.

14. Брайтцев Э.В., Сиссе М., Ватин Н.И. Определение звукоизоляции воздушного шума перегородок готовых сантехнических модулей компании «Modulbau» Россия // Неделя науки ИСИ : мат. Всерос. конф. в 3 частях. Ч. 2. 2021. С. 123–126. EDN YYLOKM.

15. Усадский Д.Г. Методы технического контроля эффективных энергетических систем зданий и сооружений // Новая наука: стратегии и векторы развития. 2016. № 4–2 (76). С. 181–184. EDN VTKXAV.

16. Удалова А.П., Чернышов В.Н. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева в реальных условиях эксплуатации изделий // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 11 (281). С. 58–63. DOI: 10.14489/td.2021.11.058-063. EDN WQHUYU.

17. Чернышов А.В., Голиков Д.О., Чернышов В.Н. Метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов // Контроль. Диагностика. 2010. № 11. С. 57–61. EDN NBNGXN.

18. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка теплозащиты эксплуатируемых жилых зданий из газобетонных блоков // Энергосбережение. 2016. № 7. С. 56–72. EDN WWCNPZ.

19. Беранек Л. Акустические измерения. М. : Изд-во иностр. лит., 1952. 627 с.

20. Фокин В.М., Ковылин А.В., Усадский Д.Г. Метод определения теплофизических свойств твердых материалов с использованием волнового температурного числа // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 2 (770). С. 101–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-101-112. EDN PRGMTS.

Поступила в редакцию 8 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 16 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 21 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Михайлович Фокин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 635951; fokinvm@mail.ru;

Андрей Васильевич Ковылин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005 г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 554124, Scopus: 5721414300, ResearcherID: N-7036-2016, ORCID: 0009-0000-3497-3394; kovylin.andrei@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Patent RU No. 2767468 C1, IPK8 G01N 25/18, G01N 3/54. *Method for determining the complex of thermal and sound-physical and mechanical characteristics of solid materials* / Fokin V.M., Kovylin A.V.; proprietor Kovylin A.V.; applic. No. 2023104914 01.03.2023; Publ. 01.08.2023. Bul. No. 22.
2. Dmitrovich A.D. *Determination of thermo-physical properties of building materials*. Moscow, Gosstroyizdat, 1963. (rus.).
3. Iofe V.K., Korol'kov V. G., Sapozhkov M.A. *Handbook of Acoustics*. Moscow, Svyaz' Publ., 1979; 312. (rus.).
4. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexandrovich P.A., Sergeevna S.E. Automated portable installation to determine the thermo physical properties of the object. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2019; 16(7):3115-2120. DOI: 10.1166/jctn.2019.8228
5. Vladimirovich K.O., Aleksandrovich P.S., Alexandrovich P.A., Sergeevna S.E. Measuring the thermo physical properties of construction projects. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2019; 16(7):3121-3127. DOI: 10.1166/jctn.2019.8229
6. Shaimerdenova K.M. Investigation of the thermophysical characteristics of minerals at various heating parameters. *Eurasian Physical Technical Journal*. 2021; 18(1):70-74. DOI: 10.31489/2021no1/70-74
7. Mikailsoy F.D. On the influence of boundary conditions in modeling heat transfer in soil. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017; 90(7):67-79. DOI: 10.1007/s10891-017-1540-y
8. Yakushkin I.P. Development of a module to measure losses through building envelopes for the smart energy-saving ventilation automatic control system. *International Journal of Control Theory and Applications*. 2016; 9(30):1-7.
9. Kuznetsov G.V., Katz M.D. Analysis of conditions for determining the thermophysical characteristics of energetic materials by the laser pulse method. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2016; 10(6):978-982. DOI: 10.1134/s1990793116060051
10. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A. Thermophysical properties of Kachkanar titanomagnetite pellets. *Steel in Translation*. 2016; 46(5):329-333. DOI: 10.3103/s0967091216050168
11. Dzhuraev D.S., Safarov M.M. Studies of thermophysical properties of ferrofluids. *Measurement Techniques*. 2016; 59(7):743-746. DOI: 10.1007/s11018-016-1040-z
12. Shchukina T.V., Sheps R.F., Burak E.E. Energy-saving regimes examination during new generation building structures insulation: international multi-conference on industrial engineering and modern technologies electronic edition. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2018; 463:022072. DOI: 10.1088/1757-899x/463/2/022072
13. Kryuchkov O.B., Malenko P.I., Konovalov S.S., Kostygova O.V. The study of the influence of the initial furnace temperature on the temperature drop across the section of a billet using physical modeling. *Chernye Metally*. 2018; 12:34-40. EDN OFJHLU.
14. Braitsev E.V., Cisse M., Vatin N.I. Determination of sound insulation of air noise of partitions of ready-made sanitary modules of the company "Modulbau" Russia. *ISI Science Week : materials of the All-Russian conference in 3 parts. Part 2*. 2021; 123-126. EDN YYLOKM. (rus.).
15. Usadsky D.G. Methods of technical control of efficient energy systems of buildings and structures. *New Science: Strategies and Vectors of Development*. 2016; 4-2(76):181-184. EDN VTKXAV. (rus.).
16. Udalova A.P., Chernyshov V.N. Non-destructive testing method of materials and products thermophysical characteristics using microwave heating in products real operating conditions. *Testing. Diagnostics*. 2021; 24(11):58-63. DOI: 10.14489/td.2021.11.pp.058-063. EDN WQHUYU. (rus.).
17. Chernyshov A.V., Golikov D.O., Chernyshov V.N. Method and system of the operative control of building materials thermophysics characteristics. *Testing. Diagnostics*. 2010; 11:57-61. EDN NBNGXN. (rus.).
18. Kornienko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of thermal protection of operated residential buildings made of aerated concrete blocks. *Energosberazhenie*. 2016; 7:56-72. EDN WWCNPZ. (rus.).
19. Beranek L. *Acoustic measurements*. Moscow, Publishing House of Foreign Literature, 1952; 627. (rus.).
20. Fokin V.M., Kovylin A.V., Usadsky D.G. Method for determining the thermophysical properties of solid materials using the wave temperature number. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; 2(770):101-112. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-101-112. EDN PRGMTS. (rus.).

Received October 8, 2023.

Adopted in revised form on October 16, 2023.

Approved for publication on November 21, 2023.

BIONOTES: Vladimir M. Fokin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat Gas Supply and Ventilation; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005; Russian Federation; ID RSCI: 635951; fokinvm@mail.ru;

Andrey V. Kovylin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat Gas Supply and Ventilation; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005; Russian Federation; ID RSCI: 554124, Scopus: 5721414300, ResearcherID: N-7036-2016, ORCID: 0009-0000-3497-3394; kovylin.andrei@mail.ru.

Contribution of the authors: authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.89

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1161-1172

Роль сопротивления теплопередаче окна в формировании результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны помещения

Елена Георгиевна Малявина, Сергей Сергеевич Ландырев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Действующим нормативным документом требуемые сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций назначаются в зависимости от функционального назначения здания, конструкции и числа градусо-суток отопительного периода. Такая методика применяется ко всем наружным ограждающим конструкциям, в том числе и к окнам. Однако окна имеют сопротивление теплопередаче значительно ниже, чем массивные ограждения. Поэтому окна в большей степени, чем массивные ограждающие конструкции, влияют на формирование результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны помещения.

Материалы и методы. Более низкая результирующая температура на границе обслуживаемой зоны помещения формируется при наиболее низкой температуре наружного воздуха, т.е. при расчетной температуре наиболее холодной пятидневки. Выяснено, что в такие периоды нормы результирующей температуры часто не выполняются. Приведена линия регрессии с помощью метода наименьших квадратов, описывающая связь между t_{5}^{92} и ГСОП для помещений ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений в 30 городах РФ. Часть точек лежит ниже тренда. Именно для таких городов предлагается в процедуре нормирования сопротивления теплопередаче окна учитывать не только ГСОП, но и t_{5}^{92} .

Результаты. Определены результирующие температуры на границе обслуживаемой зоны помещений, которые показали, что оптимальные требования к результирующей температуре не выполняются никогда, а допустимые удовлетворяются при всех сопротивлениях теплопередаче окон и наружных стен, даже при нормируемых. Что касается локальной асимметрии результирующей температуры, то ее нормы удовлетворяются тоже всегда. Рассчитаны значения сопротивления теплопередаче окон, при которых удовлетворяются оптимальные результирующие температуры на границе обслуживаемой зоны помещений ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений при сохранении базовых значений сопротивлений теплопередаче наружных стен. Значения сопротивления теплопередаче окон в большинстве случаев значительно превышают максимальное значение, принятое в СП 50.13330.

Выводы. Если выбор большой ширины окна диктуется только эстетическими причинами, следует применять окна с большим чем $0,8 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ сопротивлением теплопередаче, несмотря на более высокую стоимость окна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: число градусо-суток отопительного периода, расчетная температура наиболее холодной пятидневки, функциональное назначение здания, расчет, температура внутренних поверхностей в помещении

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Малявина Е.Г., Ландырев С.С. Роль сопротивления теплопередаче окна в формировании результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны помещения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1161–1172. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1161-1172

Автор, ответственный за переписку: Елена Георгиевна Малявина, email@list.ru.

The role of heat transfer resistance of a window in formation of resulting temperature at the boundary of habitable space in a room

Elena G. Malyavina, Sergey S. Landyrev

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

ABSTRACT

Introduction. According to current regulations, values of required heat transfer resistance of external enclosing structures must comply with the purpose of a building, a structure itself and the number of degree days in a heating period. This technique applies to all external enclosing structures, including windows. However, windows have greatly lower heat transfer resistance than solid envelopes. Therefore, windows have a greater effect on temperature than solid envelopes at the boundary of habitable space in a room.

Materials and methods. The resulting temperature at the boundary of habitable space is lowest when outdoor temperature is lowest, or when temperature is lowest for five days in a row. It has been found out that during such periods standards

of resulting temperature are not met. A regression curve, made using the least squares method, is presented; it describes the relationship between t_s^{92} and the heating season degree-day (HSDD) for nursery and junior groups of preschool institutions in 30 cities of the Russian Federation. Some points are below the trendline. It is for such cities that it is proposed to take into account not only the HSDD, but also t_s^{92} when standards are set for resistance of windows to heat transfer.

Results. Resulting temperatures at the boundary of habitable space in a room are determined. They show that optimal requirements for resulting temperature are never met, while acceptable requirements are met for all values of heat transfer resistance of windows and exterior walls, even if resistance to heat transfer is normalized. As for the local asymmetry of resulting temperature, its standards are also met at all times. Values of resistance of windows to heat transfer are calculated to find those that correspond to optimal resulting temperatures at the boundary of habitable areas of rooms for nursery and junior groups at preschool institutions if basic values of resistance of exterior walls to heat transfer remain unchanged. In a large number of cases, values of resistance of windows to heat transfer greatly exceed the maximum value set by Construction Regulations 50.13330.

Conclusions. If the choice of a large value of window width is only explained by aesthetic reasons, the window's resistance to heat transfer must exceed $0.8 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, despite higher costs of such windows.

KEYWORDS: number of degree-days in a heating period, design temperature of the coldest five-day period, purpose of a building, calculation, temperature of internal surfaces in a room

FOR CITATION: Malyavina E.G., Landyrev S.S. The role of heat transfer resistance of a window in formation of resulting temperature at the boundary of habitable space in a room. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1161-1172. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1161-1172 (rus.).

Corresponding author: Elena G. Malyavina, email@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Экономия энергии — приоритетное направление в строительстве. Важнейшей задачей при этом является выбор целесообразной теплозащиты зданий. Государство ужесточает требования к энергоэффективности зданий [1]. В то же время до сих пор некоторые авторы [2] считают увеличение теплозащиты основным и самым надежным средством повышения энергоэффективности зданий. Другие уповают на современные технологии биоклиматической архитектуры высокотехнологичных фасадных систем [3]. В работе [4] рассмотрена задача минимизации расходов на утепление и эксплуатацию здания. Для проведения исследования получена формула оптимальной толщины утепления в виде решения квадратного уравнения с параметрами, учитывающими стоимость: производства теплоты, утепления, фасадов, системы отопления, потерь, связанными с расходом денежных средств. Справедливо считается, что от уровня теплозащиты зависит стоимость возведения здания [5] и энергопотребление на его отопление и охлаждение [6]. Причем достаточно много авторов обращают внимание на поддержание допустимого микроклимата в православных храмах [7, 8]. Энергосбережение и энергоэффективность зданий не должны достигаться за счет невыполнения требуемых нормами параметров микроклимата [9–11].

От теплозащиты наружных ограждающих конструкций, регламентируемой СП¹, зависит не только энергопотребление инженерными системами, поддерживающими заданную температуру внутреннего воздуха. От нее также зависит формирование радиационной температуры по объему помещения, которая является составной частью результирующей

температуры, нормируемой ГОСТ², что рассмотрено в труде [12]. Расчету результирующей температуры помещения посвящена публикация [13]. В результате выполненного исследования предложена новая зависимость, в которой весовые коэффициенты для температуры воздуха и средней радиационной температуры выражаются в виде полинома второго порядка функции от подвижности воздуха. Расчет параметров микроклимата в помещениях рассмотрен во многих работах [14–20].

Действующий в настоящее время СП¹ изменением № 1 внес серьезное ужесточение требований к сопротивлению теплопередаче окон жилых и общественных зданий, увеличив их так, что они лежат в интервале от $0,49$ до $0,8 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. А в детских дошкольных, лечебно-профилактических, общеобразовательных зданиях и интернатах диапазон сопротивлений теплопередаче окон остался на прежнем уровне, т.е. от $0,3$ до $0,8 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Никакими другими причинами, кроме экономических, оставление низких значений сопротивлений теплопередаче окон для муниципальных зданий объяснить нельзя, хотя в эту категорию попадают самые уязвимые по здоровью люди.

В то же время следует обратить внимание на то, что указанные детские дошкольные, лечебно-профилактические, общеобразовательные здания и интернаты имеют несколько отличающиеся друг от друга нормы результирующей температуры. В табл. 1 приведены минимальные нормы результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны по требованиям ГОСТ².

Так, для детских дошкольных учреждений выделяются отдельные нормы результирующей температуры для ясельных и младших групп, а также

¹ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. С Изменениями № 1 и 2.

² ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.

Табл. 1. Минимальные нормы результирующей температуры в обслуживаемой зоне помещений

Table 1. Minimum standards of resulting temperature in habitable space of a room

Жилые комнаты Habitable rooms				Детские дошкольные учреждения Preschool institutions				Медицинские организации и интернаты Medical organizations and boarding schools				Административные помещения, помещения общеобразовательных учреждений, °C Office premises, premises of educational institutions, °C	
в районах с температурой наиболее холодной пятидневки выше –31 °C in areas with the coldest five-day temperature above –31 °C		в районах с температурой наиболее холодной пятидневки –31 °C и ниже in areas with the coldest five-day temperature –31 °C and below		ясельных и младших групп, °C nursery and junior groups, °C		средних и дошкольных групп, °C secondary and preschool groups, °C		больничных палат, °C hospital ward, °C		кабинетов врачей, процедурных, °C doctors' offices, treatment rooms, °C			
Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable
19	17	20	19	20	19	18	17	19	17	19	19	18	17

для средних и дошкольных групп. В медицинских учреждениях следует различать больничные палаты, отнесенные к категории 1 общественных зданий, и кабинеты врачей, процедурные, входящие в категорию 5. Административные помещения и помещения общеобразовательных учреждений относятся к категории 2. Для жилых комнат нормы результирующей температуры индивидуальны для населенных пунктов с различной температурой наиболее холодной пятидневки.

Что касается локальной асимметрии результирующей температуры, то она нормируется для помещений различного функционального назначения одинаковой: для оптимальных условий не большей чем 2,5 °C, а для допустимых — не более 3,5 °C.

Понятно, что одинаковые нормы результирующей температуры не означают, что для помещений с разными нормами сопротивления теплопередаче стен, покрытий и перекрытий и особенно окон фактические значения результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны окажутся одинаковыми.

Цель исследования — выяснение сопротивлений теплопередаче окон в районах с различным числом градусо-суток отопительного периода и расчетной температурой наиболее холодной пятидневки, при которых будут обеспечены нормы результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны помещения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы в дальнейшем правильно рассчитать результирующие температуры на границе обслуживаемой

зоны следует определить базовые (по табл. 3 СП¹) и нормируемые (с понижающим коэффициентом 0,63 к базовому значению) сопротивления теплопередаче для наружных стен и окон для зданий различного функционального назначения. Они зависят от температуры внутреннего воздуха. Эти температуры, выбранные по ГОСТ² как минимальные из оптимальных значений, равны: для жилых комнат 20 °C в районах с температурой наиболее холодной пятидневки выше –31 °C, 21 °C ниже –31 °C; для ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений 21 °C; для средних и дошкольных групп 19 °C; для больничных палат, а также кабинетов врачей и процедурных 20 °C; для образовательных учреждений, а также для административных помещений 19 °C. В табл. 2 для 9 городов РФ приведены значения градусо-суток отопительного периода (ГСОП) для указанных выше значений температуры внутреннего воздуха, а в табл. 3 — сопротивлений теплопередаче наружных ограждающих конструкций с учетом ГСОП и функционального назначения зданий.

Понятно, что наименьшие значения результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны, в соответствии с ГОСТ² отстоящей от периметра наружных ограждающих конструкций на 0,5 м, сформируются при расчетной зимней температуре наружного воздуха по равной температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92. На возражение, что расчетная температура бывает очень редко, можно заметить, что расчетная температура является средней за 5 последовательных

Табл. 2. Число градусо-суток отопительного периода
Table 2. Number of degree-days in a heating period

Город City	ГСОП, °С·сут, для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8 °С HSDD, °C·day for a period with an average daily outdoor temperature of no more than 8 °C			ГСОП, °С·сут, для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 10 °С HSDD, °C·day, for a period with an average daily outdoor temperature of no more than 10 °C		
	$t_{B/V} = 19\text{ °C}$	$t_{B/V} = 20\text{ °C}$	$t_{B/V} = 21\text{ °C}$	$t_{B/V} = 19\text{ °C}$	$t_{B/V} = 20\text{ °C}$	$t_{B/V} = 21\text{ °C}$
Краснодар Krasnodar	2380	2526	2672	2574	2739	2905
Астрахань Astrakhan	3250	3415	3580	3384	3564	3744
Москва Moscow	4325	4529	4733	4507	4729	4951
Пермь Perm	5490	5715	5940	5663	5904	6145
Новосибирск Novosibirsk	5972	6194	6416	6096	6408	6648
Ханты-Мансийск Khanty-Mansiysk	6872	7121	7370	7022	7287	7552
Воркута Vorkuta	8493	8791	9089	8658	8975	9290
Якутск Yakutsk	10 375	10 637	10 899	10 085	10 349	10 613
Оймякон Oymyakon	12 199	12 475	12 751	12 352	12 644	12 936

Табл. 3. Сопротивления теплопередаче, м²·°C/Вт, наружных ограждающих ограждений для зданий различного функционального назначения
Table 3. Heat transfer resistance, m²·°C/W, external fencing fences for buildings of various functional purposes

Город City	Для жилых комнат For habitable rooms			Для административных помещений For office premises			Для ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений For nursery and junior groups of preschool institutions			Для средних и дошкольных групп детских дошкольных учреждений и общеобразовательных учреждений For secondary and pre-school groups of preschool institutions and secondary education institutions			Для больничных палат и кабинетов врачей, процедурных For hospital wards and doctors' offices, treatment rooms		
	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}
Краснодар Krasnodar	2,284	1,439	0,527	1,914	1,206	0,517	2,417	1,522	0,350	2,301	1,542	0,343	2,359	1,580	0,355

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Город City	Для жилых комнат For habitable rooms			Для административных помещений For office premises			Для ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений For nursery and junior groups of preschool institutions			Для средних и дошкольных групп детских дошкольных учреждений и общеобразовательных учреждений For secondary and pre-school groups of preschool institutions and secondary education institutions			Для больничных палат и кабинетов врачей, процедурных For hospital wards and doctors' offices, treatment rooms		
	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}	базовое стен R_o^{TP} basic resistance of walls R_o^{ir}	нормируемое стен $R_o^{норм}$ standardized resistance of walls R_o^{stand}	базовое окон R_o^{TP} basic resistance of windows R_o^{ir}
Астрахань Astrakhan	2,59	1,635	0,589	2,175	1,370	0,577	2,710	1,707	0,419	2,584	1,628	0,404	2,647	1,668	0,417
Москва Moscow	2,98	1,881	0,656	2,497	1,573	0,646	3,133	2,099	0,505	2,977	2,266	0,488	3,055	1,925	0,505
Пермь Perm	3,48	2,331	0,727	2,847	1,794	0,704	3,547	2,235	0,596	3,382	1,826	0,575	3,466	2,184	0,593
Новосибирск Novosibirsk	3,65	2,297	0,734	2,992	1,885	0,729	3,727	2,348	0,621	3,534	2,367	0,605	3,643	2,295	0,620
Ханты-Мансийск Khanty-Mansiysk	3,98	2,507	0,741	3,262	2,055	0,739	4,043	2,547	0,669	4,558	2,871	0,651	4,050	2,552	0,664
Воркута Vorkuta	4,581	2,885	0,761	3,748	2,361	0,755	4,651	2,930	0,727	4,439	2,791	0,716	4,541	2,861	0,724
Якутск Yakutsk	5,215	3,285	0,779	4,312	2,717	0,774	5,114	3,222	0,772	4,930	3,106	0,752	5,022	3,164	0,759
Оймякон Oymyakon	5,6	3,528	0,8	4,8	3,024	0,8	5,6	3,528	0,8	5,6	3,528	0,8	5,6	3,528	0,8

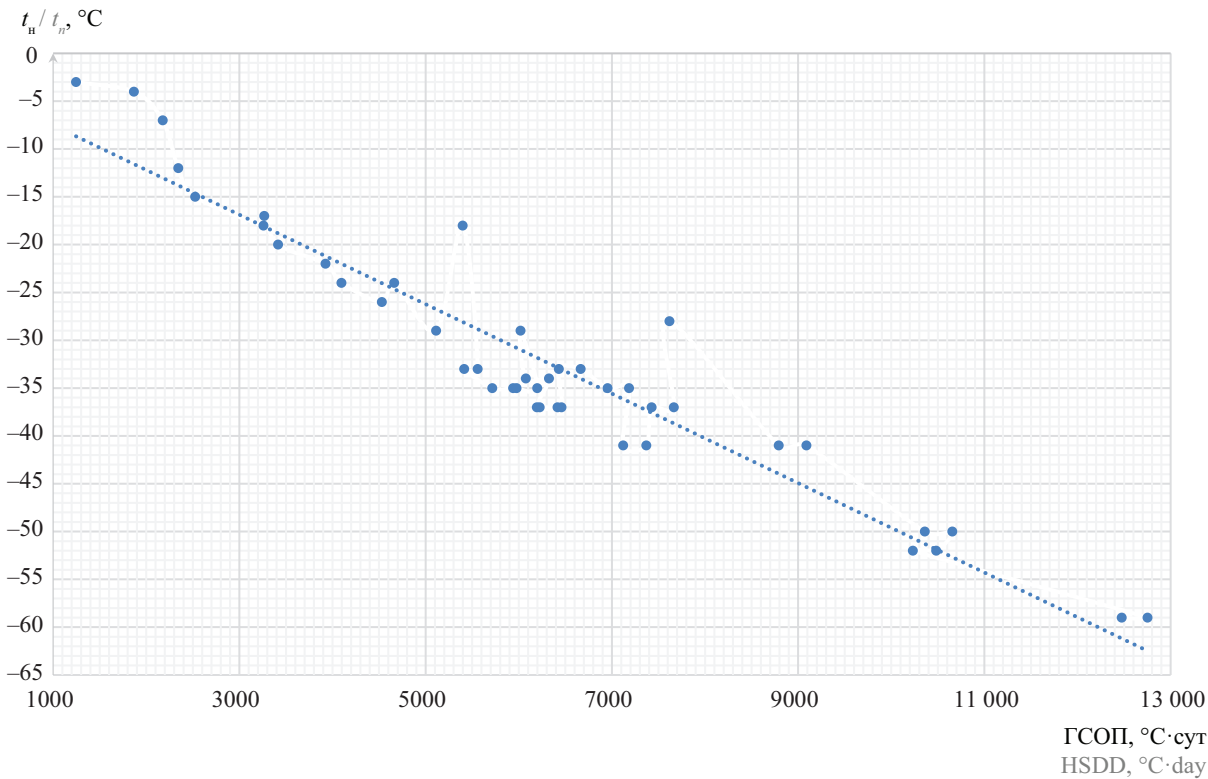
суток. Для формирования результирующей температуры в помещении важна текущая температура наружного воздуха. Естественно, что текущая температура и даже средняя за одни сутки встречаются значительно чаще. Кроме того, нормы результирующей температуры помещения должны выполняться всегда и при расчетной температуре наружного воздуха, в частности.

До августа 1995 г. сопротивления теплопередаче окон нормировались в зависимости от расчетной температуры наиболее холодной пятидневки, что в большей степени учитывало формирование микроклиматических показателей на границе обслуживаемой зоны помещения. Поэтому предлагается, сохранив

существующий подход к нормированию базового сопротивления теплопередаче окон в зависимости от ГСОП, дополнить процедуру учетом расчетной температуры наиболее холодной пятидневки t_5^{92} .

Для начала были рассмотрены данные разброса температуры пятидневки t_5^{92} от ГСОП для 30 городов РФ. Этот разброс представлен на рисунке.

Проведена линия регрессии с помощью метода наименьших квадратов, описывающая связь между t_5^{92} и ГСОП. Рисунок, для примера построенный для жилых комнат, свидетельствует о том, что часть городов имеет t_5^{92} ниже тренда, а часть — выше. Точки, лежащие выше тренда, как правило, относятся к прибрежным городам. Для таких городов



Разброс температуры наиболее холодной пятидневки от линии тренда в зависимости от фактического ГСОП для 30 городов РФ

Temperature differential for the coldest five-day period relative to the trendline depending on the actual HSDD for 30 cities of the Russian Federation

Табл. 4. Основные климатические показатели для 9 городов РФ

Table 4. Main climatic characteristics for 9 cities of the Russian Federation

Город City	Расчетная температура наиболее холодной пятидневки $t_5^{92}, ^\circ\text{C}$ Design temperature of the coldest five-day period $t_5^{92}, ^\circ\text{C}$	Трендовое значение температуры наиболее холодной пятидневки $t_5^{92}, ^\circ\text{C}$, по формуле (1) The trend value of temperature for the coldest five-day period $t_5^{92}, ^\circ\text{C}$ according to the formula (1)	Разность расчетного и трендового значений наиболее холодной пятидневки $t_5^{92}, ^\circ\text{C}$ The difference between design and trend values for the coldest five-day period $t_5^{92}, ^\circ\text{C}$
Краснодар Krasnodar	-15	-15,00	0
Астрахань Astrakhan	-20	-19,01	0,99
Москва Moscow	-26	-24,04	1,96
Пермь Perm	-35	-30,40	4,60
Новосибирск Novosibirsk	-37	-32,55	4,45
Ханты-Мансийск Khanty-Mansiysk	-41	-36,85	4,15
Воркута Vorkuta	-41	-44,61	-3,61
Якутск Yakutsk	-52	-52,78	-0,78
Оймякон Oymyakon	-59	-61,13	-2,13

достаточна процедура нормирования сопротивления теплопередаче окна по ГСОП, т.е. в соответствии с табл. 3 СП 50.13330.2012. Нас в данном случае интересуют города, чьи t_5^{92} лежат ниже тренда, т.е. в расчетный период в этих городах холоднее, чем в среднем по территории РФ. Именно для таких городов предлагается в процедуре нормирования сопротивления теплопередаче окна учитывать не только ГСОП, но и t_5^{92} . Линейное уравнение (для жилых комнат), представленное на рисунке, прямой тренд температуры наиболее холодной пятидневки в зависимости от числа градусо-суток отопительного периода, имеет вид:

$$t_5^{92} = -15 + (-45/9974) \cdot (\text{ГСОП} - 2343), \quad (1)$$

где $-45 = -60 - (-15)$ — разность значений температуры наиболее холодной пятидневки, соответствующих нижней и верхней точкам линии тренда, °C; $9974 = 12\,500 - 2526$ — разность значений ГСОП, соответствующих нижней и верхней точкам линии тренда, °C·сут; ГСОП — число градусо-суток отопительного периода, соответствующее рассматриваемому помещению в определенном городе, °C·сут.

В табл. 4 для нескольких городов РФ приведены расчетные и трендовые значения t_5^{92} .

Положительные значения разности расчетного и трендового значений t_5^{92} означают, что расчетная температура наиболее холодной пятидневки ниже трендовой. Разности, приведенные со знаком минус, относятся к городам с более высокой t_5^{92} , чем трендовое значение. Превышение означает, что требуемое сопротивление теплопередаче окна должно быть принято в соответствии с табл. 3 СП³. Для остальных городов следует повысить сопротивление теплопередаче окна.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В формировании результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны помещений, конечно, участвуют все массивные ограждающие конструкции как наружные, так и внутренние. И при расчете результирующей температуры в какой-либо точке помещения необходимо учитывать температуру внутренних поверхностей всех ограждений. Однако в связи с тем, что сопротивление теплопередаче окон значительно ниже сопротивления теплопередаче других наружных ограждений, следует полагать, что влияние окон наибольшее. Причем, чем больше площадь окна, тем ниже результирующая температура [12].

Для того чтобы определить величину надбавки к требуемому сопротивлению теплопередаче на каждый градус превышения реальной температуры наиболее холодной пятидневки над средним значением, прежде всего, были найдены значения ра-

диационной температуры и локальной асимметрии радиационной температуры на границе обслуживаемой зоны при базовых и нормативных сопротивлениях теплопередаче наружных стен и окон в рядовых комнатах промежуточных этажей. В табл. 5 представлены значения результирующей температуры и локальной асимметрии результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны в рядовых помещениях промежуточного этажа ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений.

Указанные значения упомянутых параметров приведены на среднем участке границы обслуживаемой зоны длиной 1 м напротив середины окна на высоте 1,7 м от пола. Принятая высота от пола продиктована рекомендациями ГОСТ². То есть речь не идет об одной точке напротив окна, где результирующая температура наименьшая, а локальная асимметрия радиационной температуры наибольшая.

Таблица показывает, что оптимальные требования к результирующей температуре не выполняются никогда, а допустимые удовлетворяются при всех сопротивлениях теплопередаче окон и наружных стен, даже при нормируемых. Что касается локальной асимметрии результирующей температуры, то ее нормы удовлетворяются тоже всегда. Из табл. 5 следует, что изменение сопротивлений теплопередаче наружных стен от базовых до нормируемых приводит к изменению результирующей температуры меньше чем на 0,3 °C. Это позволяет сделать вывод о преимущественном влиянии размеров и сопротивления теплопередаче окна, так как оно существенно ниже сопротивлений теплопередаче стен.

Поэтому были рассчитаны значения сопротивления теплопередаче окон, при которых удовлетворяются оптимальные результирующие температуры на границе обслуживаемой зоны помещений ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений при сохранении базовых значений сопротивлений теплопередаче наружных стен. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Указанные значения сопротивления теплопередаче окон в большинстве случаев значительно превышают максимальное значение, принятое в СП 50.13330. Прежде всего обращают на себя внимание большие цифры требований к сопротивлению теплопередаче окон для выполнения оптимальных норм результирующей температуры даже при базовых сопротивлениях теплопередаче стен. Оптимальные нормы результирующей температуры на границе обслуживаемой зоны при расчетной температуре наружного воздуха при нормируемых сопротивлениях теплопередаче стен в холодный период года не удовлетворяются тем более, так как нормируемые сопротивления стен меньше базовых.

Что касается допустимых требований к результирующей температуре, то видно, что практически

³ СП 131.13330.2020. Строительная климатология. СНиП 23-01-99*.

Табл. 5. Результирующие температуры и локальные асимметрии результирующей температуры при базовых значениях сопротивлений теплопередаче наружных стен и окон (над чертой) и при нормируемых значениях сопротивлений теплопередаче наружных стен и базовых окон (под чертой)

Table 5. Resulting temperatures and local asymmetries of the resulting temperature at the base values of the heat transfer resistances of the exterior walls and windows (above the line) and at the normalized values of the heat transfer resistances of the exterior walls and base windows (below the line)

Город City	При ширине окна 1,5 м For the window width of 1.5 m		При ширине окна 3 м For the window width of 3 m	
	результирующей температуры t_R , °C resulting temperature, t_R , °C	локальной асимметрии результирующей температуры local asymmetry of resulting temperature	результирующей температуры t_R , °C resulting temperature t_R , °C	локальной асимметрии результирующей температуры local asymmetry of resulting temperature
Краснодар Krasnodar	19,135/18,975	2,035/2,17	18,81/18,73	2,465/2,485
Астрахань Astrakhan	19,165/18,99	1,965/2,135	18,835/18,77	2,42/2,41
Москва / Moscow	19,215/19,045	1,87/2,045	18,905/18,835	2,31/2,295
Пермь / Perm	19,315/19,005	1,91/2,09	18,875/18,8	2,35/2,34
Новосибирск Novosibirsk	19,2/19,02	1,885/2,065	18,89/18,815	2,32/2,31
Ханты-Мансийск Khanty-Mansiysk	19,185/19,02	1,93/2,07	18,89/18,815	2,33/2,31
Воркута / Vorkuta	19,31/19,16	1,74/1,87	19,025/18,95	2,115/2,12
Якутск / Yakutsk	19,21/19,05	1,075/2,04	18,885/18,82	2,35/2,32
Оймякон Oymyakon	19,17/19,015	1,985/2,12	18,825/18,765	2,465/2,45

Табл. 6. Сопротивления теплопередаче окон, м²·°C/Вт, обеспечивающие оптимальные при базовых сопротивлениях теплопередаче стен и допустимые при базовых сопротивлениях теплопередаче стен над чертой и нормируемых под чертой требования к результирующей температуре на границе обслуживаемой зоны при расчетной температуре наружного воздуха для холодного периода года в ясельных и младших группах детских дошкольных учреждений

Table 6. Values of window resistance to heat transfer, m²·°C/W, ensuring (1) optimal requirements for resulting temperature at the boundary of habitable space, and (2) acceptable requirements for resulting temperature at the boundary of habitable space for basic cases of resistance of walls to heat transfer above the line and standardized resistance values below the line for design outdoor temperature during cold seasons, designed for rooms of nursery and junior groups of preschool institutions

Город City	При ширине окна 1,5 м With a window width of 1.5 m		При ширине окна 2 м With a window width of 2 m		При ширине окна 2,5 м With a window width of 2.5 m		При ширине окна 3 м With a window width of 3 m	
	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable
Краснодар Krasnodar	1,70	0,35/0,35	1,8	0,35/0,39	1,9	0,38/0,41	2,0	0,4/0,42
Астрахань Astrakhan	2,0	0,419/0,419	2,1	0,419/0,45	2,3	0,43/0,45	2,5	0,45/0,50
Москва / Moscow	2,4	0,505/0,505	2,6	0,505/0,51	2,8	0,505/0,54	3,0	0,53/0,57
Пермь / Perm	3,0	0,596/0,596	3,05	0,596/0,596	3,1	0,6/0,65	3,2	0,65/0,7
Новосибирск Novosibirsk	3,646	0,621/0,621	3,646	0,621/0,65	3,646	0,63/0,7	3,646	0,65/0,72

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Город City	При ширине окна 1,5 м With a window width of 1.5 m		При ширине окна 2 м With a window width of 2 m		При ширине окна 2,5 м With a window width of 2.5 m		При ширине окна 3 м With a window width of 3 m	
	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable	Оптимальные Optimal	Допустимые Acceptable
Ханты-Мансийск Khanty-Mansiysk	3,98	0,669/0,669	3,980	0,669/0,7	3,980	0,669/0,72	3,980	0,7/0,75
Воркута / Vorkuta	4,58	0,727/0,727	4,581	0,727/0,727	4,581	0,727/0,727	4,581	0,727/0,75
Якутск / Yakutsk	3,5	0,772/0,772	3,8	0,772/0,8	4,0	0,772/0,85	4,50	0,82/0,9
Оймякон Oymyakon	3,6	0,8/0,8	3,8	0,8/0,9	4,5	0,85/0,95	4,5	0,9/1,0

для всех выбранных городов требования к сопротивлениям теплопередаче ужесточаются, но не на много.

Поэтому данные из таблицы, превышающие 0,8 м²·°С/Вт, следует рассматривать как желательные, но по экономическим причинам в настоящее время нецелесообразные. Кроме того, в помещениях ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений следует применять здания с базовым сопротивлением теплопередаче стен, особенно с окнами большой ширины. А в районах с температурой наиболее холодной пятидневки –31 °С и ниже при новом строительстве и реконструкции зданий всегда сооружать стены с базовым сопротивлением теплопередаче, даже при удовлетворении норм энергопотребления на отопление и вентиляцию здания при более низком значении сопротивления теплопередаче. В то же время, если выбор большой ширины окна диктуется только эстетическими причинами, необходимо применять окна с большим чем 0,8 м²·°С/Вт сопротивлением теплопередаче, несмотря на более высокую стоимость окна.

Нормы сопротивления теплопередаче окна для жилых помещений более жесткие по сравнению с окнами ясельных и младших групп детских дошкольных учреждений. В жилых комнатах рас-

четная температура внутреннего воздуха меняется от 20 до 21 °С при опускании расчетной температуры наиболее холодной пятидневки ниже –31 °С. Поэтому оптимальные нормы результирующей температуры резко возрастают с таким переходом.

В административных помещениях нормы сопротивления теплопередаче окон такие же, как в жилье. Однако расчетной температурой внутреннего воздуха является температура 19 °С, что снижает требования к результирующей температуре, но в то же время нормы сопротивления теплопередаче наружных стен ниже, чем для жилья и детских дошкольных учреждений, это требует более высокого сопротивления теплопередаче окон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отсутствие проверки на стадии проектирования требований ГОСТ² приводит к невыполнению этих норм.

Предлагается при нормировании требуемого сопротивления теплопередаче окон учитывать не только градусо-сутки отопительного периода, как это принято сейчас, а и расчетную температуру наружного воздуха для холодного периода года.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Борисов К.Б.* О новых требованиях энергоэффективности зданий. Проект приказа Минстроя России. Ч. 1. Положительные и отрицательные аспекты // Энергосбережение. 2022. № 7. С. 36–41. EDN GXWULG.

2. *Горишков А.С.* Теплотехнические характеристики ограждающих конструкций зданий. Ч. 2. Российские принципы нормирования // Энергосбережение. 2017. № 8. С. 33–39. EDN ZUGGLV.

3. *Генералова Е.М.* Роль фасадных систем в борьбе за энергоэффективность // АВОК: Вентиля-

ция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2017. № 8. С. 48–53. EDN ZVHVQJ.

4. *Окунев А.Ю.* Оптимизация утепления наружных стен на примере частных жилых домов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 126–139. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-126-139. EDN VUHEQK.

5. *Yelisetti S., Saini V.K., Kumar R., Lamba R., Saxena A.* Optimal energy management system for residential buildings considering the time of use price with

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 7, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 7, 2024

swarm intelligence algorithms // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 59. P. 105062. DOI: 10.1016/j.job. 2022.105062

6. Lu J., Xue Y., Wang Z., Fan Y. Optimized mitigation of heat loss by avoiding wall-to-floor thermal bridges in reinforced concrete buildings // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 30. P. 101214. DOI: 10.1016/j.job.2020.101214

7. Кочев А.Г., Соколов М.М., Кочева Е.А., Федотов А.А. Практическое использование альтернативных энергетических ресурсов в православных храмах // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 7 (727). С. 78–85. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-727-7-78-85. EDN PGDICY.

8. Старкова Л.Г., Морева Ю.А., Новоселова Ю.Н. Оптимизация микроклимата в православном храме методом числового моделирования воздушных потоков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Т. 18. № 3. С. 53–59. DOI: 10.14529/build180308. EDN XYKLOX.

9. Karpenko A.V., Petrova I.Yu. The conceptual model of neuro-fuzzy regulation of the microclimate in the room // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Issue 30. Pp. 636–640. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.229

10. Teitelbaum E., Meggers F. Expanded psychrometric landscapes for radiant cooling and natural ventilation system design and optimization // Energy Procedia. 2017. Vol. 122. Pp. 1129–1134. DOI: 10.1016/j.egypro. 2017.07.436

11. Malz S., Steininger P., Dawoud B., Krenkel W., Steffens O. On the development of a building insulation using air layers with highly reflective interfaces // Energy and Buildings. 2021. Vol. 236. P. 110779. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110779

12. Малявина Е.Г., Ландырев С.С. Зависимость параметров микроклимата на границе обслуживаемой зоны помещения от размеров окна // Жилищное строительство. 2022. № 8. С. 44–52. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-8-44-52. EDN DXSVPP.

13. Санкина Ю.Н., Рябова Т.В., Сулин А.Б., Деими-Даитбаяз М., Лысёв В.И. Обоснование параметра результирующей комфортной температуры // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 28–33. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-28-33. EDN AQIQY.

14. De Luca F., Naboni E., Lobaccaro G. Tall buildings cluster form rationalization in a Nordic climate by factoring in indoor-outdoor comfort and energy // Energy and Buildings. 2021. Vol. 238. P. 110831. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110831

15. Teitelbaum E., Meggers F. Expanded psychrometric landscapes for radiant cooling and natural ventilation system design and optimization // Energy Procedia. 2017. Vol. 122. Pp. 1129–1134. DOI: 10.1016/j.egypro. 2017.07.436

16. Cannistraro M., Trancossi M. Enhancement of indoor comfort in the presence of large glazed radiant surfaces by a local heat pump system based on Peltier cells // Thermal Science and Engineering Progress. 2019. Vol. 14. P. 100388. DOI: 10.1016/j.tsep. 2019.100388

17. Zhang S., Zhu N., Lv S. Human response and productivity in hot environments with directed thermal radiation // Building and Environment. 2021. Vol. 187. P. 107408. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107408

18. Forouzandeh A. Prediction of surface temperature of building surrounding envelopes using holistic microclimate ENVI-met model // Sustainable Cities and Society. 2021. Vol. 70. P. 102878. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102878

19. Frolova A.A., Landyrev S.S. Microclimate parameters evaluation for spaces with windows of different thermal protection // Light & Engineering. 2021. Vol. 29. Issue 5. Pp. 61–67. DOI: 10.33383/2021-078

20. Zhang L., Yu X., Lv Q., Cao F., Wang X. Study of transient indoor temperature for a HVAC room using a modified CFD method // Energy Procedia. 2019. Vol. 160. Pp. 420–427. DOI: 10.1016/j.egypro. 2019.02.176

Поступила в редакцию 24 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 24 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 4 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Георгиевна Малявина — кандидат технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 636414, Scopus: 56646619900, ResearcherID: ABC-7206-2021, ORCID: 0000-0002-5832-8530; email@list.ru;

Сергей Сергеевич Ландырев — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 878594, ORCID: 0000-0001-9302-907X; lanserser@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Borisov K.B. On the new requirements for the energy efficiency of buildings. Draft order of the Ministry of Construction of Russia. Part 1. Positive and negative aspects. *Energoberezhenie*. 2022; 7:36-41. EDN GXWULG. (rus.).
2. Gorshkov A.S. Thermal characteristics of the enclosing structures of buildings. Part 2. Russian principles of rationing. *Energoberezhenie*. 2017; 8:33-39. EDN ZUGGLV. (rus.).
3. Generalova E.M. The role of facade systems in the struggle for energy efficiency. *AVOK: Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal*. 2017; 8:48-53. EDN ZVHVQJ. (rus.).
4. Okunev A.Yu. Optimization of external wall insulation in private buildings. *Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(1):126-139. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-126-139. EDN VUHEQK. (rus.).
5. Yelisetti S., Saini V.K., Kumar R., Lamba R., Saxena A. Optimal energy management system for residential buildings considering the time of use price with swarm intelligence algorithms. *Journal of Building Engineering*. 2022; 59:105062. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.105062
6. Lu J., Xue Y., Wang Z., Fan Y. Optimized mitigation of heat loss by avoiding wall-to-floor thermal bridges in reinforced concrete buildings. *Journal of Building Engineering*. 2020; 30:101214. DOI: 10.1016/j.jobee.2020.101214
7. Kochev A.G., Sokolov M.M., Kocheva E.A., Fedotov A.A. Practical use of alternative energy resources in orthodox temples. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2019; 7(727):78-85. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-727-7-78-85. EDN PGDICY. (rus.).
8. Starkova L.G., Moreva Yu.A., Novoselova Yu.N. Optimization of microclimate in an orthodox church by numerical simulation of air flow. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2018; 18(3):53-59. DOI: 10.14529/build180308. EDN XYKLOX. (rus.).
9. Karpenko A.V., Petrova I.Yu. The conceptual model of neuro-fuzzy regulation of the microclimate in the room. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(30):636-640. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.229
10. Teitelbaum E., Meggers F. Expanded psychrometric landscapes for radiant cooling and natural ventilation system design and optimization. *Energy Procedia*. 2017; 122:1129-1134. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.436
11. Malz S., Steininger P., Dawoud B., Krenkel W., Steffens O. On the development of a building insulation using air layers with highly reflective interfaces. *Energy and Buildings*. 2021; 236:110779. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110779
12. Malyavina E.G., Landyrev S.S. Dependence of the microclimate parameters at the boundary of the room serviced area on the size of the window. *Housing Construction*. 2022; 8:44-52. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-8-44-52 EDN DXSVPP. (rus.).
13. Sankina Iu.N., Ryabova T.V., Sulin A.B., Deymi-Dashtebayaz M., Lysev V.I. Justification of the resulting comfortable temperature parameter. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021; 1:28-33. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-28-33. EDN AQIQIY. (rus.).
14. De Luca F., Naboni E., Lobaccaro G. Tall buildings cluster form rationalization in a Nordic climate by factoring in indoor-outdoor comfort and energy. *Energy and Buildings*. 2021; 238:110831. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110831
15. Teitelbaum E., Meggers F. Expanded psychrometric landscapes for radiant cooling and natural ventilation system design and optimization. *Energy Procedia*. 2017; 122:1129-1134. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.436
16. Cannistraro M., Trancossi M. Enhancement of indoor comfort in the presence of large glazed radiant surfaces by a local heat pump system based on Peltier cells. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019; 14:100388. DOI: 10.1016/j.tsep.2019.100388
17. Zhang S., Zhu N., Lv S. Human response and productivity in hot environments with directed thermal radiation. *Building and Environment*. 2021; 187:107408. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107408
18. Forouzandeh A. Prediction of surface temperature of building surrounding envelopes using holistic microclimate ENVI-met model. *Sustainable Cities and Society*. 2021; 70:102878. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102878
19. Frolova A.A., Landyrev S.S. Microclimate parameters evaluation for spaces with windows of different thermal protection. *Light & Engineering*. 2021; 29(5):61-67. DOI: 10.33383/2021-078
20. Zhang L., Yu X., Lv Q., Cao F., Wang X. Study of transient indoor temperature for a HVAC room using a modified CFD method. *Energy Procedia*. 2019; 160:420-427. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.176

Received March 24, 2024.

Adopted in revised form on March 24, 2024.

Approved for publication on June 4, 2024.

B I O N O T E S : **Elena G. Malyavina** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research**

University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 636414, Scopus: 56646619900, ResearcherID: ABC-7206-2021, ORCID: 0000-0002-5832-8530; email@list.ru;

Sergey S. Landyrev — postgraduate student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 878594, ORCID: 0000-0001-9302-907X; lancerser@mail.ru.

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

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 332.145:711

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1173-1185

Методика делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации

Светлана Анатольевна Ершова^{1,2}, Светлана Александровна Шишелова^{1,2},
Тамара Николаевна Орловская³

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

² Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский
и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга»
(СПб ГКУ «НИИЦ Генплана Санкт-Петербурга»); г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Отсутствие единых подходов к формированию и развитию агломераций, нормативной правовой базы методического обеспечения агломерационных процессов, официально установленного понятийного аппарата в данной области, оценке агломерационных эффектов, утвержденной методики делимитации границ агломерации — все в совокупности тормозит процесс принятия обоснованных решений по урегулированию ряда территориальных, социально-экономических и транспортных проблем, возникающих в связи с расширением межрегиональных интеграционных взаимодействий между различными субъектами РФ. В этой связи разработка методики делимитации границ для Санкт-Петербургской агломерации особенно актуальна. Предмет исследования — нормативно-методическое обеспечение процессов формирования агломераций, цель — разработка методического обеспечения процесса создания и развития городских агломераций в рамках сбалансированной градостроительной политики и правовой базы обеспечения интеграционных процессов в агломерациях.

Материалы и методы. Материалом для исследования послужили научные работы по формированию и развитию агломераций. Использованы методы системного анализа и обобщения результатов научно-практических работ по установлению критериев делимитации границ агломераций. На основе анализа научных трудов российских ученых, результатов практических исследований петербургских специалистов, специфики формирования Санкт-Петербургской агломерации предложена методика делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации.

Результаты. Выявлены наиболее сложные теоретические и методические проблемы делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации, сформулированы основные принципы формирования и развития городских агломераций, определяющие требования к установлению границ; ключевые критерии делимитации Санкт-Петербургской агломерации, учитывающие ее специфику. Предложена методика установления границ Санкт-Петербургской агломерации — выделены ее главные этапы и методы исследований, применяемые на каждом из этапов. Определены значимые проблемы в области правовой поддержки процессов формирования и развития агломераций.

Выводы. Научная новизна и практическая значимость исследования обусловлены выявленными проблемами в области нормативного обеспечения агломерационных процессов, не позволяющими обеспечить активизацию развития агломераций. Предложенная методика установления границ Санкт-Петербургской агломерации опирается на объективные закономерности пространственного развития двух субъектов РФ и учитывает специфику их взаимодействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городская агломерация, делимитация границ агломерации, Санкт-Петербургская агломерация, методика создания агломераций, принципы формирования агломераций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ершова С.А., Шишелова С.А., Орловская Т.Н. Методика делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1173–1185. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1173-1185

Автор, ответственный за переписку: Светлана Анатольевна Ершова, S.Ershova@kga.gov.spb.ru.

Methodology for delimiting borders of the St. Petersburg agglomeration

Svetlana A. Ershova^{1,2}, Svetlana A. Shishelova^{1,2}, Tamara N. Orlovskaya³

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

² State Research and Design Center of Saint Petersburg Master Plan; Saint Petersburg, Russian Federation;

³ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The lack of unified approaches to (1) formation and development of agglomerations, (2) the regulatory legal framework for the methodological support of agglomeration processes, (3) the official conceptual framework in this area, (4) the assessment of agglomeration effects, (5) the approved methodology for delimiting agglomeration boundaries hinders the process of making informed decisions needed to solve a number of territorial, socio-economic, and transport problems arising in connection with the expansion of trans-regional integratory interactions between various constituent entities of the Russian Federation. In this regard, development of a border delimitation methodology for the St. Petersburg agglomeration is particularly relevant. The subject of the research is regulatory and methodological support for agglomeration processes. The goal is to develop a system of methodological support for creating and developing urban agglomerations within the framework of a well-balanced urban planning policy and legal framework of integratory processes in agglomerations.

Materials and methods. The material for the study is the research focused on formation and development of agglomerations. Methods of system analysis and generalization of research results and practical work were applied to set the criteria for delimiting the boundaries of agglomerations. A methodology for delimiting the boundaries of the St. Petersburg agglomeration is proposed on the basis of analysis of research works of Russian scientists, results of practical research by St. Petersburg specialists, and special features of the St. Petersburg agglomeration.

Results. The most complex theoretical and methodological problems of delimitation of the boundaries of the St. Petersburg agglomeration are identified; basic principles of formation and development of urban agglomerations are formulated to define the requirements for establishing boundaries; the main criteria for the delimitation of the St. Petersburg agglomeration are formulated, taking into account its specific features. A methodology for establishing the boundaries of the St. Petersburg agglomeration is proposed. Its main stages and research methods, used at each stage, are highlighted. The main problems of the legal support of formation and development of agglomerations are formulated.

Conclusions. The research novelty and practical significance of the study result from the problems identified in the field of the regulatory support of agglomeration processes, which do not allow intensifying the development of agglomerations. The proposed methodology for establishing the boundaries of the St. Petersburg agglomeration is based on objective spatial development patterns of the two constituent entities of the Russian Federation and takes into account specific features of their interaction.

KEYWORDS: urban agglomeration, delimiting boundaries of an agglomeration, St. Petersburg agglomeration, methodology for creating agglomerations, agglomeration formation principles

FOR CITATION: Ershova S.A., Shishelova S.A., Orlovskaya T.N. Methodology for delimiting borders of the St. Petersburg agglomeration. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1173-1185. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1173-1185 (rus.).

Corresponding author: Svetlana A. Ershova, S.Ershova@kga.gov.spb.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития общества необходимым условием регионального развития становится создание и развитие городских агломераций. Решение проблем, связанных с созданием в агломерации комфортной урбанизированной среды, ее соответствия стандартам качества жизни, возможно путем обеспечения правовой поддержки принимаемых управленческих решений при условии методологической и методической проработки ряда концептуальных вопросов формирования агломераций как центров пространственного развития, взаимоувязке решений, принимаемых в целях развития агломераций, и приоритетов устойчивого развития территорий.

Существующие тенденции в формировании и развитии агломераций демонстрируют возможность агломерационных процессов обеспечить со-

временное развитие территорий, их экономическую связанность. Формирование агломерации содействует созданию общей социально-экономической, инвестиционной, транспортной, природно-экологической среды урбанистических формирований. Внедрение системы управления городскими агломерациями позволяет обеспечить достижение планируемых параметров развития территории, создание благоприятных условий жизнедеятельности для населения агломерации, способствует эффективному использованию накопленного экономического потенциала территории городской агломерации.

Вместе с тем по вопросу о положительных и негативных сторонах процессов формирования и развития агломерации в России существуют две полярные позиции.

Сторонники оценки агломерационных процессов как положительного явления отмечают безус-

ловность возникновения эффекта синергии, создание предпосылок для экономии бюджетных средств, территориальных и людских ресурсов, возможность решения социальных, экологических и инженерно-транспортных проблем [1, 2].

В работах [1, 3] указаны следующие положительные эффекты, возникающие в процессе формирования агломераций: формирование единого рынка труда, оптимизация миграционных процессов, сбалансированное развитие социально значимых объектов, оптимизация транспортных схем, проектов развития объектов транспортной и инженерной инфраструктур, бюджетных расходов и т.д.

Сторонники более критичных оценок последствий создания агломераций [3, 4] подчеркивают, что «городские агломерации пока играют роль не «полюсов роста», а скорее «черных дыр», всасывающих в себя население и ресурсы..., что приводит к деформации пространства» [3, с. 57]. По мнению П.А. Минакира, «общемировая тенденция гиперурбанизации, приводящая к формированию городских агломераций-полюсов, создающих «пространственные сгустки экономической деятельности», в России не приводит к пульсации экономической деятельности, особенно на периферии» [4, с. 12]. Л.В. Мельниковой также ставится под сомнение безусловность максимального и позитивного воздействия агломерационного эффекта на конкурентные преимущества города [5]. Ею отмечено: «Представляется, что современные исследователи сосредоточились на положительных эффектах агломерации в ущерб отрицательным — тем, которые возникают после достижения городом определенного (оптимального) размера. Это скученность, перегруженность инфраструктуры, экологические проблемы, и, что крайне важно с точки зрения эффективности, — увеличение издержек в связи с ростом цен на землю, недвижимость и труд» [5, с. 16].

В исследовании [6], в частности, определены проблемы стихийного развития агломераций: рост транспортных потоков; ухудшение экологической обстановки; увеличение издержек на строительство новых объектов инфраструктуры и содержание существующих.

Г.М. Лаппо также призывает к осторожности и взвешенности в политике ускорения агломерационных процессов в России: «агломерации, безусловно, сохранят свою ведущую роль в расселении..., однако... повсеместное их развитие, создание вопреки реальным условиям, весьма накладно» [7, с. 20].

Необходимо отметить, что агломерационный подход к решению вопросов развития урбанизированных территорий имеет как положительную, так и обратную сторону — мощные агломерации, имея неоспоримые экономические преимущества, «вбирают» в себя экономически активное население

со всей территории страны, приводя значительные по размеру территории к «опустошению».

Очевидно, что, с одной стороны, способствуя росту инвестиционного и человеческого потенциалов, создавая предпосылки для формирования совершенной среды жизнеобеспечения, агломерационные процессы запускают механизмы формирования конфликтных зон, обостряют внутренние противоречия социальной среды, способствуют росту неравномерности в развитии территорий. Подводя итог вышеизложенному, нельзя не согласиться с высказыванием А.Н. Швецова: «Значение городских агломераций, как и любого сложного социально-экономического явления, не может быть оценено однозначно» [3, с. 49].

Обзор концептуальных подходов к процессам формирования агломераций и методик установления их границ выявляет разногласия не только в области теории, но и в практической сфере. Все в целом порождает определенные трудности у органов власти, влияет на принятие эффективных решений по развитию агломераций. Очевидно, что выход из сложившейся ситуации возможен лишь при разработке единой методической платформы, учитывающей требования российского законодательства, обеспечивающей определение единого порядка разработки делимитации границ агломерации для субъектов Российской Федерации. В этой связи была сформулирована гипотеза о необходимости решения частной задачи разработки методики делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации, учитывающей особенности включения в ее состав субъекта РФ — города федерального значения Санкт-Петербурга и субъекта РФ — Ленинградской области, в результате чего станет возможным выделение территорий, обеспечивающих эффективное пространственное развитие агломерации, как это рассмотрено в работе [8]. Решение поставленной проблемы позволит решить вопросы создания и развития агломераций на современном этапе с учетом особенностей включаемых в нее территорий.

Подтверждение сформулированной авторами гипотезы определяет цель исследования — разработку методического обеспечения процесса создания и развития городских агломераций в рамках сбалансированной градостроительной политики и правовой базы обеспечения интеграционных процессов в агломерациях.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- проанализировать основные научные подходы к формированию и развитию агломераций;
- сформулировать основные принципы формирования и развития агломераций, определяющие требования к установлению границ;
- предложить методику делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации, учитывающую особенности входящих в нее субъектов РФ, обеспе-

чивающую наиболее эффективное использование потенциала включаемых в агломерацию территорий.

Теоретическая база исследования

Приоритетом современного пространственного развития регионов России становится модернизация экономического пространства, включающая «поддержку сбалансированного и устойчивого развития городских агломераций», которые в современных условиях становятся «основными базовыми единицами исследования и планирования развития расселения» [6, с. 4].

В настоящее время под агломерацией понимается территориальное экономическое образование, возникающее на базе крупного города, создающего значительную зону урбанизации, характеризующееся высокой плотностью населения, оказывающее влияние на социально-экономическую структуру окружающей территории [1, с. 24].

По мнению О.В. Красовской и С.В. Скатерщикова: «Агломерации являются ключевыми элементами, фокусными точками, узлами опорного каркаса системы расселения страны» [1, с. 24].

В процессе исследования всего многообразия предлагаемых дефиниций понятия «городские агломерации» специалистами ИПРЭ РАН были выделены следующие основные научные подходы к формированию и развитию агломераций [6, с. 35, 36]:

- экономический (регионально-экономический), с акцентом на значимое проявление принципа эмерджентности в развитии территориальных экономических систем;
- экономико-географический (функционально-расселенческий), с акцентом на исследование систем расселения и транспортных связей;
- градостроительно-планировочный, с акцентом на значительные по площади высокоплотные урбанизированные территории с развитыми системами мест приложения труда и инженерно-транспортной инфраструктурой;
- организационно-управленческий, с акцентом на административно-управленческую составляющую, значимую в формировании и развитии урбанизированной территории.

Несмотря на то, что «многие связанные с формированием и развитием городских агломераций понятия и смыслы до сих пор не получили однозначно трактуемых дефиниций, можно тем не менее говорить о существовании довольно устоявшегося понятийного аппарата, позволяющего разобраться в сути указанного феномена» [3, с. 47].

По мнению А.Н. Швецова, «при всем многообразии разноречивых формулировок... сущность понятия городские агломерации в них идентична» [3, с. 47], а агломерация — это «компактная пространственная группировка городских и сельских поселений, объединенных многообразными интенсивными связями (хозяйственными, трудовыми, культурно-бытовыми, рекреационными и др.)» [3, с. 48].

Теоретико-методические вопросы делимитации границ городских территорий тесно связаны с сущностью понятия «городская агломерация». С научной и практической точек зрения особую сложность вызывает порядок определения и установления границ агломерации [6, с. 53; 1, с. 27], поскольку официально утвержденная методика определения границ агломерации отсутствует. При этом имеет место большое «разнообразие предлагаемых различными авторами и применяемых в различных странах методик делимитации городских агломераций» [9, с. 28].

Среди зарубежных исследователей агломерационных процессов следует особо выделить работы испанских ученых И.М. де Лехарса и Х.М. де Лехарса, посвященные применимости эмпирических моделей при делимитации границ агломерации [10], работы Ж.К. Мартори и Х. Суриньяк, посвященные изучению классических моделей плотности городского населения и практики их применения для агломерации Барселоны [11], работы испанских и итальянских ученых Р. Буа, П. Венери, В. Альмени, Ф. Эрнандес по методике корректировки границ полицентрических агломераций [12], исследования критериев делимитации границ агломераций и зон интенсивной урбанизации ученых Д. Дюбуа, С. Рабюэля, Л. Дейкстера, Х. Поэлмана [13, 14], сравнительные исследования американских и европейских глобальных городов и регионов на основе выделенных дефиниций методом стандартизированной оценки уровня урбанизации А. Фримана [15], работы по изучению стратегических подходов, социально-экономического и институционального потенциала и возможностей управления развитием глобальных городов и регионов норвежских ученых В. Кнаппа и П. Шмитта [16], методологические вопросы классификации поселений на основе плотностных характеристик территории ученых П. Бибби и П. Бриндли [17], изучение глобальных пространственных процессов и формирования баз данных о глобальных городах и агломерациях ученых А.Дж. Флорчик, К. Корбейн, Д. Эрлих, С. Фрейре, Т. Кемпер, Л. Маффенини, М. Мельчиорри, М. Пезарези, П. Политис, М. Скъявина, Ф. Сабо, Л. Занкетта [18].

В настоящее время в России выделяют: административный подход, согласно которому делимитация границ агломерации базируется на административно-территориальном делении; экономический подход как альтернативу географической сущности агломерации, рассматривающий агломерацию как экономическую категорию, основанный на сравнительном анализе экономических показателей; морфологический подход, базирующийся на исследовании показателей степени урбанизированности территории; функциональный подход, в основе которого лежат исследования взаимосвязей ядра и периферии агломерации, и сетевой подход

[19, с. 32], являющийся [9, с. 17] разновидностью функционального подхода.

Для установления границ агломерации на практике применяются следующие методы:

- анализ данных дистанционного зондирования Земли для создания схемы современного состояния территории (в том числе выявление территорий сплошной высокоплотной застройки) [1, с. 27];
- анализ транспортной доступности ядра агломерации (определение изохрон 1,5–2-часовой доступности — методика Института географии РАН и ее модификация — методика, разработанная Ф.М. Литенгуртом в ЦНИИПградо строительства) [19, с. 22; 6];
- установление границ на основе транспортной доступности для ежедневных транспортных миграций с учетом административно-территориальных границ в зоне интенсивной урбанизации¹;
- метод светового пятна на ночных космических изображениях территории региона [1, с. 27, 28];
- методики на основе инструментов получения и обработки обосновывающей пространственной информации (Big Data) [19, с. 42];
- методику на базе информации о передвижениях абонентов сотовых компаний [20, с. 49];
- методику Организации экономического сотрудничества и развития на основе анализа плотности населения и потоков поездок на работу [20, с. 50].

В статье [20, с. 50] подходы к делимитации сгруппированы уже на несколько иной основе: подходе на базу критерия транспортно-временной доступности (установление границ агломерации по 1,5–2-часовой изохроне); на основе показателей степени урбанизированности территории (отсутствие существенных разрывов в застройке); на основе оценки уровня массовых трудовых миграций. Авторы труда [20, с. 50], подчеркивая невозможность использования вышеуказанных подходов для делимитации Московской агломерации, предложили универсальный подход — экономико-географический, дополненный пространственно-временными концепциями.

А.Э. Райсик считает, что «мировая практика делимитации практически всех агломераций основана на применении морфологического и функционального (включая сетевой) подходов» [9, с. 29], в то время как, по мнению Е.В. Антонова и А.Г. Махровой, в мире и в России преобладает «функционально-расселенческий подход» [19, с. 32].

В статье А.Г. Уляевой [21, с. 22, 23] достаточно полно и глубоко раскрыты критерии делимитации, отраженные в отечественной и зарубежной научной литературе. Анализ методических подходов к опре-

делению границ городских агломераций, содержащихся в научных работах, показал, что наиболее часто встречающимися критериями делимитации границ являются критерии: транспортной доступности до ядра агломерации; интенсивности маятниковой трудовой миграции; минимально допустимой плотности населения; максимально допустимых разрывов между зданиями; людности города-ядра; выделения сетки экономических микрорайонов [1, 6].

Проведенный авторами статьи анализ научных понятий, использованных в теоретических и практических работах по исследованию агломерационных процессов [4, 6, 22–24], подходов к определению «агломерация» и установлению границ агломерации [3, 9, 21], позволил выявить ряд проблем, связанных с особенностями формирования Санкт-Петербургской агломерации и делимитацией ее границ, в частности, необходимость учета сложившейся системы разнообразных взаимодействий на территории Санкт-Петербургской агломерации и требований нормативных правовых актов в области градостроительной деятельности при разработке методики делимитации границ агломерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научную основу исследования составили труды российских и зарубежных ученых в области исследования агломерационных процессов [3–6, 10–19, 20, 21], фундаментальные работы в области развития теории пространственной экономики ученых М. Фуджита, П. Кругмана, А. Венейблса, Р.Дж. Тейлора, К. Кларка, А. Леша, В. Кристаллера [25–30], труды ученых Института географии РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова [19, 20], ИПРЭ РАН [6], научно-исследовательские и проектные работы петербургских специалистов [23, 24].

В процессе исследования проведен анализ научных и научно-методических работ в сфере делимитации границ агломерации [1, 9, 20, 21], нормативных правовых актов и методических документов в области процессов формирования и развития агломераций [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Являясь точками экономического и социального роста, агломерации в идеале должны способствовать обеспечению условий для роста инвестиционного потенциала, качества жизни населения и качества городской среды на агломерированной территории. Целью формирования Санкт-Петербургской агломерации стала настоятельная необходимость урегулирования ряда территориальных, социально-экономических, транспортных и демографических проблем, возникших в связи с расширением стабильных межрегиональных связей между двумя субъектами РФ — Санкт-Петербургом и Ленинградской областью.

¹ Концепция совместного градостроительного развития Санкт-Петербурга и территорий Ленинградской области (агломерации) на период до 2030 года с перспективой до 2050 года.

На основе результатов научных исследований [9, 20, 21, 23, 24] авторами настоящей статьи сформулированы основные принципы формирования и развития городских агломераций, учитывающие объективные закономерности их пространственного развития и определяющие требования к установлению границ:

- принцип обеспечения территориальной целостности, единства правового и экономического пространства в установленных границах городской агломерации;
- принцип комплексного подхода к социально-экономическому развитию территорий в установленных границах;
- принцип рационального использования территориальных, трудовых и иных ресурсов в установленных границах;
- принцип выбора наиболее эффективного варианта пространственного развития агломерации;
- принцип учета сложившегося административно-территориального деления в границах агломерации.

В процессе исследования были сформулированы ключевые критерии делимитации Санкт-Петербургской агломерации: ядром агломерации является Санкт-Петербург; внешняя зона агломерации расположена на территории Ленинградской области и развита неравномерно, следовательно, одним из критериев служит необходимость установления зоны интенсивной урбанизации, наиболее активно вовлеченной в систему межрегиональных взаимодействий с городом-ядром по ряду признаков — транспортные связи, миграционные процессы, социально-экономическая и градостроительная развитость территории и т.д.; транспортная доступность до ядра агломерации; уровень качества жизни ядра и периферии агломерации.

На основе функционально-расселенческого подхода, базирующегося на критериях делимитации, важнейшими из которых являются численность городского населения и транспортная доступность до центра тяготения (ограничение изохроной 1,5–2-часовой доступности любым видом общественного транспорта), результатов научно-практических работ петербургских специалистов [23, 24] предложена методика делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации.

Поскольку предлагаемая методика делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации относится к типу индивидуальных, опирающихся на информацию и данные о Петербургской агломерации, ее задачей становится установление границ на периферии. На рисунке приведены основные этапы методики установления границ Санкт-Петербургской агломерации и ключевые методы исследований, используемые на каждом из этапов.

На первом этапе при установлении ориентировочных границ ареала агломерации критериями

делимитации выступают численность городского населения и транспортная доступность до центра тяготения — ограничение изохроной 1,5-часовой доступности любым видом общественного транспорта. При этом использование методики OESD позволяет, не привязываясь к установленным административно-территориальным делениям границ, определить ареал агломерации. По результатам проведенного исследования установлены площадь агломерации (8,8 тыс. км²), численность населения агломерации (6 млн чел.) и плотность населения в агломерации (7 чел/га). В территорию агломерации включены те муниципальные образования, более 15 % населения которых совершают ежедневные поездки в ядро агломерации с различными целями. Сложности при установлении территории агломерации и, следовательно, определении численности населения были связаны с тем, что применение различных методик подсчета давало существенный разброс показателей.

На втором этапе проведена комплексная оценка территории на предмет уточнения степени освоенности территории, в том числе оценка интенсивности урбанизационных процессов для установления зоны интенсивной урбанизации. В рамках второго этапа определяется градостроительный потенциал и градостроительная емкость территории, позволяющие установить возможности стратегического развития территории при использовании всех имеющихся ресурсов, и степень фактического освоения территории в пределах выявленного ареала. Оценка градостроительной емкости территории агломерации выполняется на основе анализа градостроительных и экономических показателей, отражающих ключевые процессы улучшения качества жизни населения, и анализа сложившейся системы расселения, плотностных характеристик населенных мест, расположенных на территории агломерации. Важнейшей составляющей этого этапа исследования является оценка демографических ресурсов и определение численности населения в выделенной зоне интенсивной урбанизации на перспективу. Проведенный авторами сравнительный анализ субъектов РФ, входящих в состав Санкт-Петербургской агломерации, позволил выделить следующее:

- в области действующей нормативно-правовой базы, учитывая компетенцию и распределение полномочий органов власти различного уровня, выявлены существенные различия в подходах к формированию системы управления развитием территорий, регулирование которых осуществляется для Санкт-Петербурга — в соответствии с ч. 3 ст. 63 Градостроительного кодекса Российской Федерации (далее — ГрК РФ), для Ленинградской области — в соответствии со ст. 14 ГрК РФ;

- в области пространственного и экономического развития существенны различия у Санкт-Петербурга и Ленинградской области: по числен-

ности населения Санкт-Петербург превосходит Ленинградскую область в 3 раза, а по площади территории Санкт-Петербург в 60 раз меньше Ленинградской области. Валовой региональный продукт (ВРП) Санкт-Петербурга значительно превышает ВРП Ленинградской области. Санкт-Петербург также существенно превосходит Ленинградскую область по объему и качеству предоставляемых услуг населению;

- в области инвестиционного развития активизация жилищного строительства на приграничных с Санкт-Петербургом территориях создает значительные трудности по обеспечению стандартов качества жизни населения, в первую очередь проживающего на территории Ленинградской области, поскольку строительство объектов социальной инфраструктуры должно осуществляться за счет местных бюджетов, изначально не рассчитанных на подобные масштабы жилищного строительства.

По результатам проведенного на этом этапе исследования сформулированы следующие основные проблемы: при высоком уровне заинтересованности органов власти двух субъектов РФ в развитии Санкт-Петербургской агломерации необходимо создание специального межрегионального органа управления, ответственного за координацию градостроительной и социально-экономической деятельности; имеют место накопленные нерешенные проблемы инвестиционного и градостроительного развития приграничных территорий. Был сделан вывод о целесообразности формирования Санкт-Петербургской агломерации как единого объекта, несмотря на имеющиеся сложности правового обеспечения процесса создания и развития агломерации на территории двух самостоятельных субъектов РФ.

На третьем этапе проводится разработка возможных сценариев территориального и пространственного развития агломерации, предполагающих, как правило, рассмотрение пессимистического, оптимистического и наиболее реального вариантов пространственного развития, а также выделение в рамках предложенных вариантов укрупненных функциональных зон. По результатам исследования предложено выполнить зонирование территории по степени интенсивности урбанизации и уровня ее хозяйственного освоения. Выделены: центральная высокоурбанизированная зона; высокоурбанизированная зона консолидированного развития; зона подцентров агломерации; субурбанизированная зона консолидированного развития; зона жилой; общественно-деловой и производственной застройки; «зеленые» зоны, обеспечивающие рекреационные функции, и зоны сельскохозяйственного использования.

Четвертый этап — выбор наиболее приемлемого варианта формирования и развития агломерации. На этом этапе определяется потребность населения, проживающего на территории интенсивной урбанизации, в объектах социальной, культурно-бытовой

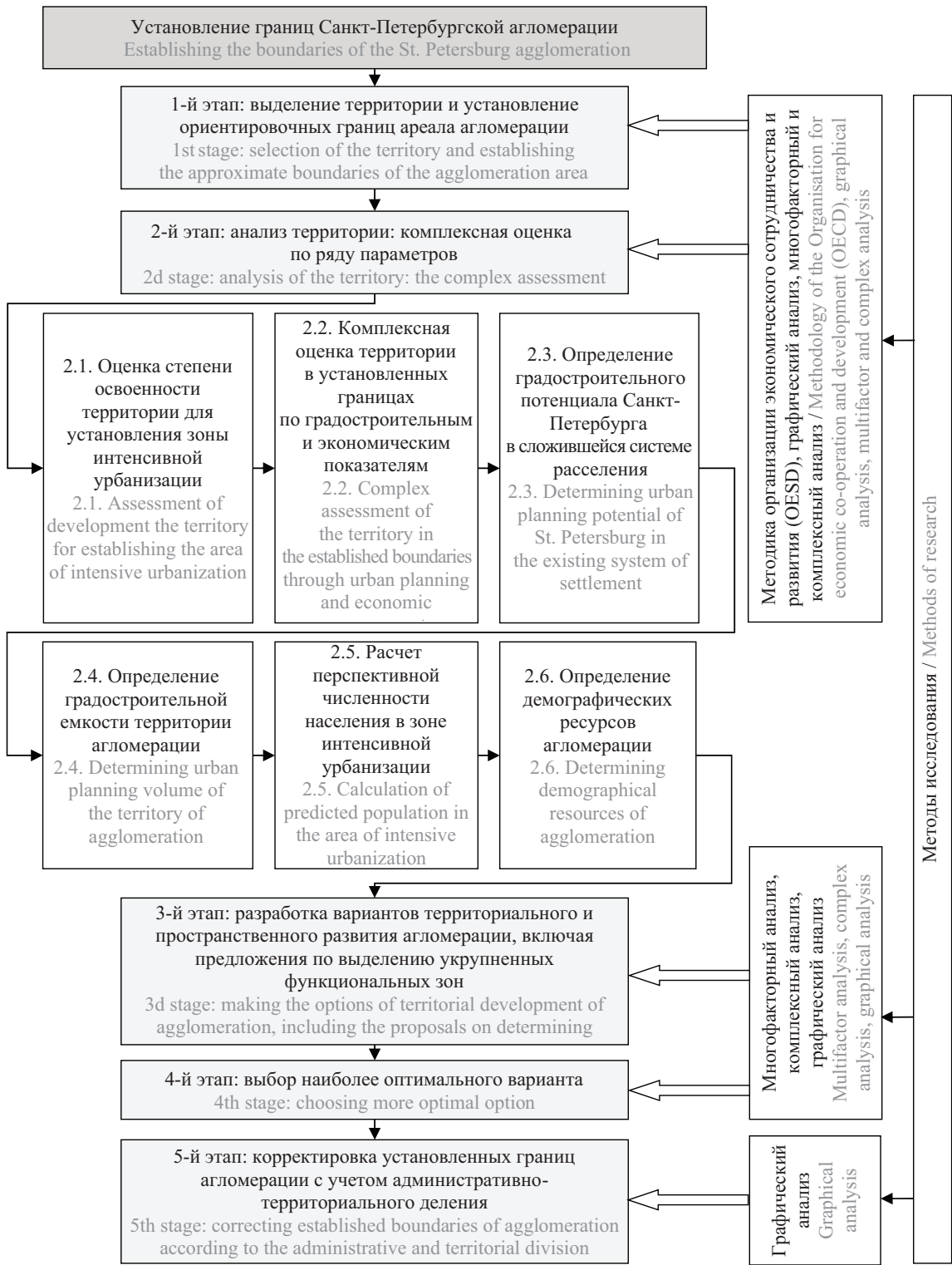
и коммунальной инфраструктуры для целей «проведения градостроительного обоснования размещения объектов регионального значения, в том числе для перспективного транспортного и инженерного развития территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области»¹ и разработки предложений по применению единых нормативов градостроительного проектирования в агломерации. Предложенная дифференциация территорий (см. третий этап методики) нацелена на нивелирование имеющихся различий в принятых социальных стандартах качества жизни и качества городской среды в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Для центральной высокоурбанизированной зоны и высокоурбанизированной зоны консолидированного развития необходимо выравнивание уровня качества городской среды с целью снижения количества перемещений для обеспечения постоянных и периодических потребностей населения. В зоне подцентров агломерации, помимо цели повышения уровня качества городской среды, необходима конкретизация функционального назначения подцентра, формирование его как точки тяготения для обеспечения выявленных в процессе исследования приоритетных потребностей населения. Выделение субурбанизированной зоны консолидированного развития связано с наличием территорий, способствующих развитию курортных функций. В зонах жилой, общественно-деловой и производственной застройки, «зеленых» зонах, обеспечивающих рекреационные функции, и зонах сельскохозяйственного использования следует обеспечить эффективное размещение населения при условии удовлетворения нормативной потребности в объектах социальной, инженерной и коммунальной инфраструктур и соблюдения всех планировочных ограничений.

Пятый этап — корректировка границ агломерации по результатам проведенного отбора, учитывающая сложившееся административно-территориальное деление. Значимость последнего этапа заключается в том, что для оптимизации системы управления агломерацией и проведения оценки эффективности управленческих решений необходимы различные статистические данные, сбор которых осуществляется Росстатом по муниципальным образованиям. По результатам проведенных исследований с учетом уточнения границ административно-территориального деления в границы территории Санкт-Петербургской агломерации были включены Санкт-Петербург и 6 районов Ленинградской области: Выборгский, Гатчинский, Тосненский, Всеволожский, Ломоносовский и Кировский. Планируемая на перспективу численность населения агломерации по зонам в период 2030–2050 гг. должна вырасти в целом на 3 %, при этом не планируется рост численности населения в зонах высокоурбанизированной и субурбанизированной консолидированного развития, а также в «зеленых»

зонах и зонах сельскохозяйственного использования. Главное внимание должно быть уделено росту численности населения в зоне подцентров агломерации (увеличение на 10 % в период 2030–2050 гг.). В зонах центральной высокоурбанизированной (Санкт-Петербург) и жилой, общественно-деловой и производственной застройки (Ленинградская об-

ласть) планируется рост численности населения на уровне 4 % в период 2030–2050 гг.

Исходя из логики действующего законодательства в области стратегического планирования, основываясь на установленных границах Санкт-Петербургской агломерации, целесообразно последовательно приступить к подготовке комплекса



Этапы методики установления границ Санкт-Петербургской агломерации
The stages of methodology for establishing the boundaries of the St. Petersburg agglomeration

градостроительных документов, направленных на повышение устойчивости рассматриваемой территории, а в разрабатываемом документе стратегического планирования должны быть определены территориальное и пространственное развитие рассматриваемых территорий, включая:

- оптимизацию планировочных структур;
- оптимизацию функционального зонирования территорий;
- планируемое размещение объектов федерального и регионального значения в области социальной, транспортной и инженерной инфраструктур на соответствующих территориях;
- создание единого пространственно-видового каркаса Санкт-Петербурга и пограничных территорий Ленинградской области.

Принципиальным решением, позволяющим достичь поставленной цели, является предложенная авторами методика делимитации границ Санкт-Петербургской агломерации в качестве единого инструмента, обеспечивающего сбалансированное развитие среды жизнеобеспечения, снижение внутренних противоречий при создании в агломерации единого социального пространства, нивелирование различий неравномерного развития территорий. Предложенная методика позволяет преодолеть имеющиеся разночтения в выборе приоритетов делимитации границ агломерации, в критериях включения в границы территорий, имеющих различный градостроительный потенциал.

Поскольку методика учитывает реалии действующего в области градостроительства законодательства, она позволяет преодолеть негативные моменты существующей практики формирования и создания агломераций, устранить субъективизм суждений при разработке вариантов пространственного развития агломерации и выборе наиболее оптимального. Развитие методического инструментария в области процессов создания агломераций на основе функционально-расселенческого подхода и сформулированных принципов, предложенные этапы контроля за развитием территорий, способствующие эффективному управлению размещением объектов регионального и муниципального значения, обеспечивающих благоприятные и безопасные условия жизнедеятельности населения, привели авторов к созданию логической основы, определяющей действия как органов власти, так и агентов в сфере делимитации границ агломерации (рисунок).

Предложенная методика учитывает, прежде всего, особенности делимитации границ агломерации, включающей два субъекта РФ — город федерального значения Санкт-Петербург и Ленинградскую область, с очевидным различием статуса и градостроительного потенциала включенных в агломерацию территорий. Для иных агломераций со сходным статусом предлагаемая методика может быть существенно упрощена.

Вместе с тем авторы считают целесообразным применение предложенной последовательности при решении сложных задач установления границ агломераций, в состав которой входят города федерального значения. Именно предложенная последовательность действий позволит органам власти и профессиональному сообществу избежать просчетов и ошибок при решении вопросов формирования агломерации и определения ее границ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренные в статье научные подходы к методике делимитации границ агломерации подтвердили наличие диаметрально противоположных взглядов на проблемы формирования и развития агломераций у представителей власти, научного и профессионального сообщества. Агломерационные процессы становятся все более сложными, охватывая большие массивы территорий и вовлекая большие и разнородные группы населения.

Проанализированные проблемы затрагивают наиболее важную, по мнению авторов, задачу — создание методики делимитации границ агломерации, позволяющей учесть наиболее значимые для агломерирования аспекты. Анализ научных исследований [1, 6, 8, 22, 24] показал, что к наиболее сложным вопросам, тормозящим развитие агломерационных процессов, относится неразвитость правовой поддержки процессов формирования и развития агломераций, в том числе при установлении границ агломерации, в частности:

- отсутствует официальное понятие термина «агломерация» и единообразное его применение в стратегических документах. На этот аспект указывают как ученые, так и практики [6, с. 27; 1, с. 31; 24, с. 12]. Кроме того, отсутствует «четкая характеристика ее основных сущностных признаков, свойств, атрибутов, отличий от понятия «большой город» [6, с. 27]. Более того, по мнению ученых, «все еще необходимо уточнение всех зависимых производных и смежных понятий и терминов, их типологии, иерархии как для теоретиков, так и для практиков в сфере... градостроительства» [6, с. 27];
- отсутствует официально утвержденная методика установления границ агломерации, что также отмечается учеными и практиками-градостроителями [6, с. 53; 1, с. 30; 24, с. 16]. То есть, как справедливо отмечено специалистами, отсутствует «правовое оформление структуры и административно-территориального деления агломерации» [1, с. 30], в том числе ядра агломерации и ее периферийных территорий;
- отсутствует единый подход к формированию обосновывающих материалов, позволяющих определить основные направления развития агломерации. Очевидна необходимость «обоснования планируемых параметров агломерации, формирование природно-экологического каркаса и системы природно-рекреационных территорий» [1, с. 30].

Планирование развития двух субъектов РФ необходимо осуществлять в соответствии с прогнозируемым развитием соответствующих каркасов — экономического, социального, экологического, пространственно-видового:

- необходимо принятие нормативного правового акта, устанавливающего для территории городской агломерации единые нормативы градостроительного проектирования, являющиеся, по существу, едиными стандартами качества жизни и качества городской среды, обеспечивающие потребности населения агломерации в объектах жизнеобеспечения [22];

- необходимо разработать положения о правовом обеспечении управления агломерационными процессами [2], в том числе межбюджетных отношений в городских агломерациях [8, 31], с регулированием, координацией и планированием их развития, при этом система управления агломерацией должна обеспечить создание действенного механизма контроля.

Ключевым направлением пространственного развития территории Санкт-Петербургской агломерации на перспективу становится децентрализация узловых (основных) градостроительных функций, позволяющая снизить маятниковые миграции, повысить доступность мест приложения труда и объектов социального назначения, нивелировать исторически сложившиеся диспропорции в степени достигнутого качества городской среды, а также оптимизировать пространственное развитие агломерации.

Результаты исследований могут быть применены при разработке документов территориального

планирования субъектов РФ — городов федерального значения Москвы, Санкт-Петербурга и Севастополя, схем территориального планирования иных субъектов РФ, концепций территориально-пространственного развития субъектов РФ, а также при определении границ и установлении планировочной структуры крупнейших российских агломераций.

Положениями научной новизны, сформулированной авторами в исследовании, являются:

- предложение при формировании границ агломерации принять за основу функционально-расселенческий подход, позволяющий учесть численность городского населения и транспортную доступность до центра тяготения, а также выделить зоны по степени интенсивности урбанизации и уровня ее хозяйственного освоения;

- сформулированные принципы формирования и развития городских агломераций, учитывающие объективные закономерности их пространственного развития и определяющие требования к установлению границ;

- предложенная методика делимитации границ агломерации, позволяющая обеспечить условия для роста градостроительного потенциала, качества жизни и качества городской среды в агломерации.

Именно применение предложенного методического инструментария будет способствовать урегулированию ряда территориальных, социально-экономических, транспортных и демографических проблем, возникающих в связи с расширением стабильных межрегиональных связей между субъектами РФ, чьи территории (в том числе части территории) могут быть включены в агломерацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Красовская О.В., Скатерщиков С.В. Вопросы определения границ и развития планировочной структуры крупнейших агломераций России применительно к схеме территориального планирования Санкт-Петербурга и Ленинградской области, включающей Санкт-Петербургскую городскую агломерацию // Архитектурный Петербург. 2018. № 3 (58). С. 24–31.

2. Остякова А.В., Плюснина Е.В. Благоустройство парковых комплексов городских агломераций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 2. С. 294–306. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.294-306. EDN PFYDNG.

3. Швецов А.Н. Городская агломерация — организационная форма преобразования пространства в Российской Федерации // Федерализм. 2017. № 2 (86). С. 47–60. EDN YUKASH.

4. Минакир П.А. Национальная стратегия пространственного развития: добросовестные заблуждения или намеренные упрощения? // Пространственная экономика. 2016. № 3. С. 7–15. DOI: 10.14530/se.2016.3.007-015. EDN WMRCNX.

5. Мельникова Л.В. Размеры городов, эффективность и экономический рост // ЭКО. 2017. № 7 (517). С. 5–19. EDN YUSMFZ.

6. Булычева Н.В., Гресь Р.А., Кузнецов С.В., Жихаревич Б.С., Калужный Н.А., Кузнецов С.В. и др. Санкт-Петербургская агломерация: этапы формирования и перспективы развития : монография. СПб. : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем региональной экономики» Российской академии наук, 2022. 219 с. DOI: 10.52897/978-5-8088-1758-6-2022. EDN UJKKCI.

7. Лаппо Г.М. Разнообразие городов как фактор успешного пространственного развития России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 4. С. 3–23. DOI: 10.31857/S2587-5566201943-23. EDN GDYQJX.

8. Шишелова С.А. Проблематика создания и развития агломерации как варианта современного развития территорий в разрезе экономической без-

опасности региона // Архитектурный Петербург. 2018. № 3 (53). С. 105–107.

9. *Райсун А.Э.* К вопросу об определении границ городских агломераций: мировой опыт и формулировка проблемы // Демографическое обозрение. 2020. Т. 7. № 1. С. 27–53. EDN ROCTCH.

10. *De Lejarza y Esparducer J.M., de Lejarza y Esparducer I.M.M.* Delimitación de áreas metropolitanas mediante un modelo anisótropo de decrecimiento exponencial. Una aplicación al caso del Área Metropolitana de Valencia // Estudios de Economía Aplicada. 2002. Vol. 20. Issue 2. Pp. 471–486.

11. *Martori J.C., Suriñach J.* Classical models of urban population density. The case of Barcelona metropolitan area // 41st Congress of the European Regional Science Association. 2001.

12. *Boix R., Veneri P., Almenar V.* Polycentric metropolitan areas in Europe: towards a unified proposal of delimitation // Defining the Spatial Scale in Modern Regional Analysis. 2012. Pp. 45–70. DOI: 10.1007/978-3-642-31994-5_3

13. *Dubois D., Rabuel S.* L'adaptation de l'offre de transports en commun aux territoires vécus. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques. Dépôt légal : 4e trimestre. 2007. 116 p.

14. *Dijkstra L., Poelman H., Veneri P.* The EU-OECD definition of a functional urban area // OECD Regional Development Working Papers. 2019. DOI: 10.1787/d58cb34d-en

15. *Freeman A.* Towards a common standard: comparing European and American cities // Greater London Authority Economics Working Papers. 2005. № 13.

16. *Knapp W., Schmitt P.* Re-structuring competitive metropolitan regions in north-west-europe: on territory and governance // European Journal of Spatial Development. 2003. Vol. 1. Issue 6. Pp. 1–42. DOI: 10.5281/zenodo.5126714

17. *Bibby P., Brindley S., Brindley P.* Urban and rural area definitions for policy purposes in England and wales: methodology (v1.0) // Office for National Statistics. 2013. 36 p.

18. *Florczyk A.J., Corbane C., Ehrlich D., Freire S., Kemper T., Maffneni L. et al.* GHSL Data Package 2019 // EUR 29788 EN. 2019. DOI: 10.2760/290498

19. *Антонов Е.В., Махрова А.Г.* Крупнейшие городские агломерации и формы расселения над-агломерационного уровня в России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019.

№ 4. С. 31–45. DOI: 10.31857/S2587-55662019431-45. EDN DTYQEB.

20. *Махрова А.Г., Бабкин Р.А.* Методические подходы к делимитации границ Московской агломерации на основе данных сотовых операторов // Региональные исследования. 2019. № 2 (64). С. 48–57. DOI: 10.5922/1994-5280-2019-2-5. EDN GIGLUP.

21. *Уляева А.Г.* Анализ методических подходов к выделению агломерационных образований // Региональная экономика: теория и практика. 2016. № 12 (435). С. 17–27. EDN XEJOQX.

22. *Ершова С.А., Орловская Т.Н.* Стратегия территориального планирования Санкт-Петербургской агломерации: модель управления, качество жизни населения, безопасность среды жизнедеятельности // Архитектурный Петербург. 2018. № 3 (53). С. 98–101.

23. *Садикова И.Б., Алешина Т.Г.* Схема территориального планирования Санкт-Петербурга и Ленинградской области — взгляд на использование и реализацию совместного документа территориального планирования при внесении изменений в Генеральный план Санкт-Петербурга // Архитектурный Петербург. 2018. № 3 (53). С. 16–22.

24. *Садикова И.Б.* Открытие агломерации. Видение и позиции Санкт-Петербурга по отношению к городской агломерации // Архитектурный Петербург. 2017. № 6 (49). С. 12–16.

25. *Fujita M., Krugman P.* The New economic geography. Past, present and the future // Papers in Regional Science. 2004. Vol. 83. Issue 1. Pp. 139–164. DOI: 10.1007/s10110-003-0180-0

26. *Fujita M., Krugman P., Venables A.* The spatial economy. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1999. DOI: 10.7551/mitpress/6389.001.0001

27. *Taylor P.J.* Distance decay in spatial interactions. CATMOG 2. Concepts and techniques in modern decigram Nu. 2. University of Newcastle upon Tyne, 1983. 19 p.

28. *Clark C.* Urban population densities // Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General). 1951. Vol. 114. Issue 4. P. 490. DOI: 10.2307/2981088

29. *Lösch A.* Die räumliche Ordnung der Wirtschaft. 1962. 380 p.

30. *Christaller W.* Central places in Southern Germany. Prentice-Hall, Inc., 1966. 230 p.

31. *Свириденко М.В.* Формирование концепции пространственного развития территории Санкт-Петербургской агломерации: целесообразность проведения согласованной инвестиционной политики // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2022. № 1 (68). С. 92–97. DOI: 10.52897/2411-4588-2022-1-92-97. EDN BBOTIJ.

Поступила в редакцию 8 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 29 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 25 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Светлана Анатольевна Ершова** — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры организации строительства и управления недвижимостью; **Национальный исследовательский**

Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; начальник Управления научно-методического обоснования градостроительного развития Санкт-Петербурга; Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга» (СПб ГКУ «НИПЦ Генплана Санкт-Петербурга»); 191023, г. Санкт-Петербург, ул. Зодчего Росси, д. 1–3; РИНЦ ID: 319827, Scopus: 56478980400, ORCID: 0000-0001-6100-6404; S. Ershova@kga.gov.spb.ru;

Светлана Александровна Шишелова — соискатель кафедры организации строительства и управления недвижимостью; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заместитель начальника Управления научно-методического обоснования градостроительного развития Санкт-Петербурга; Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга» (СПб ГКУ «НИПЦ Генплана Санкт-Петербурга»); 191023, г. Санкт-Петербург, ул. Зодчего Росси, д. 1–3; РИНЦ ID: 1079007, ORCID: 0009-0000-4439-4513; s.shishelova@yandex.ru;

Тамара Николаевна Орловская — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономической безопасности; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1009372, Scopus: 57202818324, ORCID: 0000-0003-3521-7229; e-tamara@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Krasovskaya O.V., Skatershchikov S.V. De-limitation of boundaries and development of the planning structure of the largest agglomerations of Russia in relation to the territorial planning scheme of the St. Petersburg urban agglomeration. *Architectural Petersburg*. 2018; 3(53):24-30. (rus.).
2. Ostyakova A.V., Pluisnina E.V. The landscaping of urban agglomeration park systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2):294-306. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.2.294-306. EDN PFYDNG. (rus.).
3. Shvetsov A.N. Urban agglomeration — the organizational form of space transformation in the Russian Federation. *Federalism*. 2017; 2(86):47-60. EDN YUKASH. (rus.).
4. Minakir P.A. The national strategy of spatial development: is it the conscientious delusion or deliberate simplification? *Spatial Economics*. 2016; 3:7-15. DOI: 10.14530/se.2016.3.007-015. EDN WMRCNX. (rus.).
5. Melnikova L.V. *City size, efficiency and economic growth*. *ECO*. 2017; 7(517):5-19. EDN YUSMFZ. (rus.).
6. Bulychева N.V., Gres R.A., Kuznetsov S.V., Zhikharevich B.S., Kalyuzhny N.A., Kuznetsov S.V. et al. *St. Petersburg agglomeration: stages of formation and prospects development : monograph*. St. Petersburg, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Problems of Regional Economics of the Russian Academy of Sciences, 2022; 219. DOI: 10.52897/978-5-8088-1758-6-2022. EDN UJKKCI. (rus.).
7. Lappo G.M. Diversity of cities as a factor of Russia's successful spatial development. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2019; 4:3-23. DOI: 10.31857/S2587-5566201943-23. EDN GDYQJX. (rus.).
8. Shishelova S.A. The issues of creation and development of agglomeration as a type territorial development policy in the context of economic security of the region. *Architectural Petersburg*. 2018; 3(53):105-107. (rus.).
9. Raysikh A. Defining the boundaries of urban agglomerations: problems, international experience, solutions and results. *Demographic Review*. 2020; 7(1):27-53. EDN ROCTCH. (rus.).
10. De Lejarza y Esparducer J.M., de Lejarza y Esparducer I.M.M. Delimitación de áreas metropolitanas mediante un modelo anisótropo de decrecimiento exponencial. Una aplicación al caso del Área Metropolitana de Valencia. *Estudios de Economía Aplicada*. 2002; 20(2):471-486.
11. Martori J.C., Suriñach J. Classical models of urban population density. The case of Barcelona Metropolitan Area. *41st Congress of the European Regional Science Association*. 2001.
12. Boix R., Veneri P., Almenar V. Polycentric metropolitan areas in Europe: towards a unified proposal of delimitation. *Defining the Spatial Scale in Modern Regional Analysis*. 2012; 45-70. DOI: 10.1007/978-3-642-31994-5_3
13. Dubois D., Rabuel S. *L'adaptation de l'offre de transports en commun aux territoires vécus*. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques. Dépôt légal : 4e trimestre 2007. 116 p.
14. Dijkstra L., Poelman H., Veneri P. The EU-OECD definition of a functional urban area. *OECD Regional Development Working Papers*. 2019. DOI: 10.1787/d58cb34d-en

15. Freeman A. Towards a common standard: comparing European and American cities. *Greater London Authority Economics Working Papers*. 2005; 13.
16. Knapp W., Schmitt P. Re-structuring competitive metropolitan regions in North-West-Europe: on territory and governance. *European Journal of Spatial Development*. 2003; 1(6):1-42. DOI: 10.5281/zenodo.5126714
17. Bibby P., Brindley S., Brindley P. Urban and rural area definitions for policy purposes in England and Wales: methodology (v1.0). *Office for National Statistics*. 2013; 36.
18. Florczyk A.J., Corbane C., Ehrlich D., Freire S., Kemper T., Maffeni L. et al. GHSL Data Package 2019. *EUR 29788 EN*. 2019. DOI: 10.2760/290498
19. Antonov E.V., Makhrova A.G. Largest urban agglomerations and forms of settlement pattern at the supra-agglomeration level in Russia. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2019; 4:31-45. DOI: 10.31857/S2587-55662019431-45. EDN DTYQEB. (rus.).
20. Makhrova A.G., Babkin R.A. Methodological approaches for Moscow urban agglomeration delimitation based on mobile network operators data. *Regional Studies*. 2019; 2(64):48-57. DOI: 10.5922/1994-5280-2019-2-5. EDN GIGLUP. (rus.).
21. Ulyaeva A.G. An analysis of methodological approaches to the determination of agglomerations. *Regional Economics: Theory and Practice*. 2016; 12(435):17-27. EDN XEJOQX. (rus.).
22. Ershova S.A., Orlovskaya T.N. Strategy of territorial planning of the St. Petersburg agglomeration: management model, quality of life, safety of the built environment. *Architectural Petersburg*. 2018; 3(53):98-101. (rus.).
23. Sadikova I.B., Alyoshina T.G. The scheme of territorial planning of St. Petersburg and the Leningrad region — a closer look at the use and implementation of a joint territorial planning document for updating the Master Plan of St. Petersburg. *Architectural Petersburg*. 2018; 3(53):16-22. (rus.).
24. Sadikova I.B. Discovering agglomeration: visions and arguments in defining St. Petersburg urban agglomeration. *Architectural Petersburg*. 2017; 6(49):12-16. (rus.).
25. Fujita M., Krugman P. The New economic geography. Past, present and the future. *Papers in Regional Science*. 2004; 83(1):139-164. DOI: 10.1007/s10110-003-0180-0
26. Fujita M., Krugman P., Venables A. *The spatial economy*. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1999. DOI: 10.7551/mitpress/6389.001.0001
27. Taylor P.J. Distance Decay in Spatial Interactions. *CATMOG 2. Concepts and techniques in modern decigram Nu. 2*. University of Newcastle upon Tyne, 1983; 19.
28. Clark C. Urban population densities. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*. 1951; 114(4):490. DOI: 10.2307/2981088
29. Lösch A. *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*. 1962; 380.
30. Christaller W. *Central places in Southern Germany*. Prentice-Hall, Inc., 1966; 230.
31. Sviridenko M.V. Formation of the concept of spatial development of the territory of the St. Petersburg agglomeration: the opportunity of a coordinated investment policy. *Economics of the North-West: Problems and Prospects of Development*. 2022; 1(68):92-97. DOI: 10.52897/2411-4588-2022-1-92-97. EDN BBOTIJ. (rus.).

Received October 8, 2023.

Adopted in revised form on March 29, 2024.

Approved for publication on April 25, 2024.

BIONOTES: **Svetlana A. Ershova** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Organization and Real Estate Management; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Department for Scientific and Methodological Justification of Urban Development of St. Petersburg; **State Research and Design Center of Saint Petersburg Master Plan**; Russian Federation; 1-3 Zodchego Rossi st., Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation; SPIN-code: 6433-7644, ID RSCI: 319827, Scopus: 56478980400, ORCID: 0000-0001-6100-6404; S. Ershova@kga.gov.spb.ru;

Svetlana A. Shishelova — applicant for the Department of Construction Organization and Real Estate Management; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Deputy Head of the Department for Scientific and Methodological Justification of Urban Development of St. Petersburg; **State Research and Design Center of Saint Petersburg Master Plan**; Russian Federation; 1-3 Zodchego Rossi st., Saint-Petersburg, 191023, Russian Federation; ID RSCI: 1079007, ORCID: 0009-0000-4439-4513; s.shishelova@yandex.ru;

Tamara N. Orlovskaya — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Chair of economic safety; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1009372, Scopus: 57202818324, ORCID: 0000-0003-3521-7229; e-tamara@mail.ru.

Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Анализ основных характеристик современных кампусов

Ольга Олеговна Донская^{1,2}, Татьяна Николаевна Кисель¹

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

² Группа «Родина»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Образование и наука в обществе являются сферами, обеспечивающими перспективы общественного и экономического развития. Для повышения качества и привлекательности образования, развития науки, привлечения талантливой молодежи необходимы определенные условия. Одно из таких условий — создание среды для получения образования и интеллектуального развития. При выборе способов развития территории и инфраструктуры современных российских университетов проанализирован опыт университетов в мире. Выявлено, что для наиболее известных университетов характерна комплексная пространственная организация территории, которую называют «кампусом». Согласно поручению Президента РФ № Пр-419, к 2030 г. в России должна быть создана сеть современных кампусов. Цель исследования — формулирование принципов организации кампуса, которые должны стать основой определения подхода к созданию пространств кампусов и формирования организационно-управленческих механизмов их функционирования. Это дает возможность в дальнейшем формировать задание для архитектурно-пространственных решений; определить требования к организации участников проекта создания кампуса, определить целевую модель и критерии эффективности реализации проекта организации кампуса.

Материалы и методы. Проанализированы 52 кампуса, предметом исследования стали особенности пространственной организации, инструменты взаимодействия с городом, функциональные особенности. Основным методом исследования выбран анализ информации.

Результаты. В результате анализа сформулированы 5 принципов организации кампусов: открытость пространств, их иерархия, идентичность пространств, отражение особенностей специализации в архитектурных решениях, а также использование пространств библиотеки в качестве «гостиной».

Выводы. Исследование принципов организации современных кампусов позволяет говорить о возникновении нового подхода к созданию пространств для университетов и кампусов. Организация пространства кампуса выражает модель взаимодействия базовых процессов, открытую или закрытую позицию университета относительно города и его запросов и является воплощением управленческой культуры университета.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кампус, культура университета, принципы проектирования, открытый кампус, мировой опыт, инновационная образовательная среда

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Донская О.О., Кисель Т.Н. Анализ основных характеристик современных кампусов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1186–1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1186-1200

Автор, ответственный за переписку: Ольга Олеговна Донская, o.donskaya@gmail.com.

Analysis of principal characteristics of modern university campuses

Olga O. Donskaya^{1,2}, Tatiana N. Kisel¹

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

² Rodina Group; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In any society education and science are at the core of social and economic development. Special conditions should be in place to improve the quality of education, make it more attractive, develop science and boost its popularity, get talented young people involved in research activities. One of these conditions is a proper environment for life, education, work and intellectual development. Cases of the largest universities around the world were analyzed to choose the way to arrange the area and infrastructure of an educational institution. The idea is that areas of such universities feature complex spatial arrangement patterns known as “a campus”. According to Presidential Instructions No. Pr-419, by 2030 a network of modern campuses should be created in Russia. The purpose of the study is to identify basic campus arrangement principles, which should serve as the basis for an approach to designing world-class campus spaces and developing management mechanisms of their operation. The identification and formulation of these principles makes it possible to (1) formulate an approach to architectural and spatial solutions, (2) outline requirements for a legal entity to be involved in a campus development project, (3) make a target campus model and identify criteria to benchmark the effectiveness of a campus project.

Materials and methods. The authors analyzed 52 campuses located worldwide. The subject of the study was the arrangement of campus space, the search for tools of interaction with the urban environment, and the identification of functional features of a campus. The main research method was information analysis.

Results. As a result of analysis of 52 modern universities, 5 principles of campus space arrangement were formulated: the openness of campus space, the hierarchy of space components, the identity of spaces, the use of specialization in architectural solutions, and the use of library spaces as “living rooms”.

Conclusions. A study of basic principles of spatial arrangement of modern campuses allows concluding that a new approach to campus spaces has emerged. Campus space arrangement determines a model of interaction between basic processes, the openness or closeness of a university in respect of a city and its requests, and implements the university's management culture.

KEYWORDS: campus, university culture, design principles, open campus, global experience, innovative educational environment

FOR CITATION: Donskaya O.O., Kisel T.N. Analysis of principal characteristics of modern university campuses. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1186-1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1186-1200 (rus.).

Corresponding author: Olga O. Donskaya, o.donskaya@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Образование и наука в любом обществе являются сферами, обеспечивающими перспективы общественного и экономического развития. Сфера образования обеспечивает подготовку кадров, способных качественно и эффективно трудиться, во многом определяет становление личности, а значит, активно участвует в формировании общественных ценностей, поддерживает сохранение культуры. Наука, в свою очередь, обеспечивает процессы научно-технического развития для экономического развития на инновационной основе.

В соответствии с уровнем значимости образования и науки основные цели и направления их развития зафиксированы в государственных стратегических документах. Одна из ключевых национальных целей развития нашей страны в соответствии с Указом Президента «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»¹ — возможности для самореализации и развития талантов, что предполагает повышение качества образования, активизацию научно-исследовательской деятельности с вхождением в десятку ведущих стран мира¹, формирование эффективной системы выявления, поддержки и развития способностей и талантов и создание условий для воспитания гармонично развитой и социально ответственной личности. Указанные национальные цели развития получили отражение также и в государственной программе Российской Федерации «Развитие образования»².

Помимо этого, вопросы развития науки и образования являются важным элементом системы

национальной безопасности. Так, Стратегией национальной безопасности Российской Федерации³ в качестве национальных интересов (среди прочих) определены:

- сбережение народа России и развитие человеческого потенциала, предполагающее выполнение задач по выявлению и развитию способностей и талантов у детей и молодежи, повышение качества общего образования, а также предоставление гражданам широких возможностей для получения среднего и высшего профессионального образования;
- устойчивое развитие российской экономики на новой технологической основе, что может быть достигнуто, в том числе, и путем преодоления критической зависимости российской экономики от импорта технологий, оборудования и комплектующих за счет ускоренного внедрения передовых российских технологических разработок.

Для повышения качества образования, роста его привлекательности, развития науки и увеличения ее популярности, в частности, среди талантливой молодежи, привлечения такой молодежи в науку необходимы определенные условия. Одно из таких условий — формирование среды для жизни, получения образования, работы и интеллектуального развития. Инструментами появления таких условий могут быть развитие территории, инфраструктуры, внутреннего пространства образовательных организаций высшего образования (ОО ВО) (далее — университеты); организация внутри пространств, удобных для общения, обучения, совместного решения учебных задач и выполнения проектов, творчества и т.д. [1]. В результате установления притягательности университета, его внутреннего и внешнего пространства может быть получен комплексный эффект. Притягательность места создает желание чувствовать себя его

¹ О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года : Указ Президента РФ от 21.07.2020 № 474. URL: <http://government.ru/docs/all/128943/>

² Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие образования» : Постановление Правительства РФ от 26.12.2017 № 1642 (ред. от 28.09.2023). 2023. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286474/

³ О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046>

частью, что служит дополнительным стимулом для эффективной учебной деятельности [2], а также вовлеченности в университетские мероприятия творческого, научного, спортивного характера и т.д., т.е. помогает в развитии социальных навыков, обеспечивает формирование активной жизненной и общественной позиции у обучающихся [3].

При выборе способов организации территории и инфраструктуры университетов проанализирован опыт наиболее крупных, известных своими достижениями в образовании и науке университетов в мире [4–7]. В ходе исследований было выявлено, что для таких вузов характерна комплексная пространственная организация территории, пространственная среда и уникальный архитектурно-пространственный облик [8–10], которую принято называть «кампусом». Под этим термином в самом общем смысле следует понимать университетский городок — комплекс зданий, сосредоточенных на одной территории и имеющих объединяющую их функцию [11]. Исходя из международного опыта мировых университетов-лидеров, уже имеющегося опыта российских университетов по созданию особой архитектурно-пространственной среды университета [12, 13], а также стратегических интересов, целей и задач нашей страны принят ряд решений, связанных с созданием в России кампусов мирового уровня.

Так, Президентом утвержден перечень поручений от 17.03.2021 № Пр-419, среди которых обеспечение в 2022–2030 гг. создания сети современных кампусов ОО ВО, расположенных в отдельных субъектах РФ, территории которых отнесены к приоритетным и приграничным геостратегическим территориям РФ (пункт 1 г).

Уже в следующем году эти планы конкретизированы. В соответствии с подпунктом «в» пункта 2 перечня поручений Президента РФ от 10.02.2022 № Пр-290 к 2030 г. было необходимо создать не менее 25 кампусов ОО ВО. По итогам двух конкурсных процедур отбора выбраны 17 городов, где на основе механизмов государственно-частного партнерства должны быть созданы кампусы мирового уровня. Общий объем строительства — 2,2 млн м². Стоимость создания — 461,7 млрд руб., из них 194,7 млрд руб. — внебюджетные источники финансирования.

29 февраля 2024 г. Президент в Послании Федеральному Собранию определил новую цель — следует реализовать не менее 40 проектов по возведению университетских кампусов. На эти цели будет выделено дополнительно 400 млрд руб. Таким образом, кампусы становятся новой моделью организации пространства российских университетов [14].

Федеральный проект (ФП) «Создание сети современных кампусов» — часть национального проекта «Наука и университеты» и связан с государственной программой «Научно-технологическое

развитие Российской Федерации». Для руководства страны и регионов важно реализовать ФП эффективно, так как он представляет собой историческую возможность перейти от студенческих городков к кампусам мирового уровня, встроив кампусы в городскую среду [15, 16] как с точки зрения единства пространства, так и пересечения социальной и культурной жизни университета и города. Такие кампусы, безусловно, способны стать мощными «точками притяжения» для студентов, жителей города, а также бизнеса, что позволит получить мультипликативный эффект и обеспечить толчок к развитию города и региона на новом уровне [17–19]. На заседании Совета по стратегическому развитию и национальным проектам в декабре 2022 г. Президентом РФ задан образ кампуса: «В ближайшее десятилетие в России должны быть созданы 25 новых университетских кампусов мирового уровня с самыми современными условиями для учебы и научной деятельности. Эти кампусы должны стать точками притяжения талантливых ребят со всей страны, а также центрами развития науки и экономики регионов расположения этих учебных заведений».

Целевая модель кампуса изложена в документе Министерства науки и образования РФ «Стандарт инновационной образовательной среды (кампусов)»⁴ (далее — Стандарт), где определены общие термины, базовые требования к функционированию, организационная модель управления проектом, социально-экономические эффекты деятельности кампусов и требования к сервисам. Согласно целевой модели, функционал кампуса обеспечивает подготовку кадров в соответствии с целями региональной стратегии социально-экономического развития; на его территории предусмотрено наличие технопарков, обеспечивающих полный цикл развития инновационных компаний; созданы комфортные условия для проживания и обучения. Модель кампусов, описанная в Стандарте, дает возможность к вариативности ее реализации с точки зрения мастерпланирования и организации пространств. Некоторые из них представляют собой набор монофункциональных инфраструктурных единиц, локализованных в границах земельного участка и объединенных единой концепцией благоустройства. Другие совмещают в одном или нескольких зданиях все заявленные функции и являются полифункциональными.

Становится очевидным, что в ближайшее десятилетие произойдут изменения в научно-образовательной модели работы университетов в связи с определением для них новой роли, которая формулируется как «акторы экономического развития страны». И ФП организации кампусов как инновационной образовательной среды положил начало пе-

⁴ Стандарт инновационной образовательной среды (кампусов). URL: 01-03-2024-standart-kampusov-28022024_240228_193015.pdf

решению подходов к созданию новой и обновлению текущей инфраструктуры университетов. Таким образом, ответ на вопрос, что такое «кампусы мирового уровня» в РФ остается открытым и актуальным. Впервые кампусом назвали территорию Принстонского университета в XVIII в. Согласно Стандарту, «Инновационная образовательная среда (кампус) — это совокупность функционально связанных объектов недвижимого и движимого имущества, объединенных назначением по комплексному обеспечению образовательной, инновационной, научной, научно-технической деятельности, предназначенных в том числе для проживания и (или) размещения, медицинского обеспечения, отдыха, туризма, занятий физической культурой и спортом, организации питания, культурно-досуговой деятельности, удовлетворения иных потребностей обучающихся, работников одной или нескольких образовательных организаций и (или) научных организаций»⁴.

В современном мире университетский кампус представляет собой комплекс, который состоит из обособленной территории или совокупности территорий, коммуникаций, зданий, дорожного покрытия и имущества, принадлежащих образовательной организации [20]. Авторы понимают под кампусом «пространство, где происходит взаимодействие широкого круга участников и возникают новые сложные формы деятельности для решения задач развития города, его экономики и университетов».

Имеющиеся в настоящее время исследования, посвященные анализу зарубежных и формируемых российских кампусов, в основном рассматривают вопросы пространственной организации кампуса, вопросы землеустройства, архитектуры и т.д. [21–23]. Однако исследования, в которых рассматриваются организационно-управленческие и финансово-экономические механизмы формирования кампусов, встречаются редко [24], что объясняется нехваткой данных и практического опыта, отсутствием отлаженных механизмов. Соответственно, создание таких механизмов — актуальная научная задача, которая должна решаться поэтапно. По мнению авторов, одним из первых этапов разработки организационно-управленческих и финансово-экономических механизмов создания в России современных кампусов является выявление принципов их организации. Установление этих принципов дает возможность формировать задание для архитектурно-пространственных решений; выявить требования к организации участников проекта создания кампуса, сформировать целевую модель кампуса и определить критерии эффективности реализации проекта создания кампуса.

Таким образом, процесс создания кампусов мирового уровня имеет три вектора. Первый вектор — это проектирование пространства и строительство инфраструктуры, основанный на выявлении ключевых принципов организации с опорой на наиболее

яркие и успешные примеры. Второй вектор — работа с наполнением кампуса содержательной деятельностью, которая приводит к сумме социально-экономических эффектов. Третий вектор — модель управления, которая позволяет содержательной деятельности случаться с запланированной эффективностью.

Цель исследования — формулирование главных принципов организации кампуса, которые в дальнейшем станут базой для определения подхода к проектированию пространства кампусов мирового уровня. Они впоследствии должны лечь в основу формирования задания на выбор земельного участка и создания архитектурно-градостроительной концепции будущих проектов кампусов. Для достижения цели поставлены задачи:

- 1) проанализировать архитектурно-градостроительные концепции кампусов в мировой практике, которые были реализованы не ранее 2010 г.;
- 2) на основе анализа выделить общие принципы организации кампуса;
- 3) сделать вывод об уточнении понятия «кампус мирового уровня».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования стали кампусы мирового уровня, предметом — особенности их пространственной организации, организации взаимодействия с городской средой, функциональные особенности, которые позволили выявить ключевые принципы их формирования.

Главным методом исследования выбран анализ информации.

Источники информации — официальные сайты университетов; сайты архитектурных компаний; авторов архитектурно-градостроительных концепций; профессиональные сайты с обзором проектов; научные статьи, посвященные вопросам организации пространства и деятельности кампусов. В ходе исследования проанализированы 52 кампуса, которые представляют собой полностью новые или продолжение существующих кампусов университетов в европейских городах, Великобритании и США. Основной критерий — срок реализации не позднее 2010 г.

На первом шаге исследования был составлен полный список объектов и проведена первоначальная выборка на предмет актуальности заданному году постройки таким образом, чтобы объекты относились к типу «современный кампус». Полнота списка определяется разнообразием географической представленности и функционального назначения. На втором этапе проведен первичный анализ, в результате которого определены и сформулированы общие принципы организации кампусов. На третьем шаге каждый принцип проектирования раскрыт и подтвержден примерами применения в разных проектах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Если дифференцировать функциональное предназначение пространств исследуемых кампусов, то в каждом из них можно выделить три типа со следующим наполнением (табл. 1).

Данный набор функций сам по себе не является значимым открытием. Ключевым результатом исследования служит выявление паттернов или принципов, на основании которых спроектированы пространства относительно друг друга и архитектурно-планировочные решения зданий. Так, в результате исследования были выявлены следующие главные принципы формирования пространства кампусов.

Принцип № 1. Открытость пространств

Здания кампуса размещены в пространстве города открытым образом. Кампус вписывается в окружающую среду единой сетью пешеходных дорог, тротуаров, бульваров. Комплекс зданий не отгораживается забором. Остекление первых этажей — или полностью стеклянные, или имеют большие окна. Главный вход доминирует в размерах и хорошо освещен. На первых этажах размещаются пространства для города. Городской пешеходный поток соприкасается с кампусом ежедневно. Университет становится неотъемлемой частью городского пространства, что позволяет ему открыто демонстрировать свою деятельность и культуру (рис. 1–4).

Принцип № 2. Иерархия пространств

Система зданий и общественных пространств создает повторяющуюся структуру, которая приво-

дит к приятному чувству порядка и интуитивной навигации. В концепции открытого современного кампуса, вписанного в город, центральное место занимают программируемые пространства нескольких назначений, в которых главная функция не является единичным прототипом. Программируемые пространства общего назначения используются для реализации социально-культурной программы, открытой городу. К ним относятся: главный лобби, библиотека, конференц-зал, лестница-амфитеатр, выставочный центр, музей, театр (рис. 5, 6). Данный тип пространств может не доминировать по занимаемым объемам площади, но именно они передают ценности и специализацию кампуса.

Монофункциональные пространства, функция которых предзадана и не может быть изменена, доминируют в объеме. К ним относятся: общежития, гостиницы, лаборатории, учебные классы, офисы профессорско-преподавательского состава (ППС), офисы компаний-резидентов, коворкинги. Монофункциональные пространства служат местом, где проходит основная деятельность. Их организация обращена внутрь кампуса, они проектируются по требованиям университета и исходя из существующей стратегии и программы развития науки и образования. Если программируемые пространства демонстрируют культуру кампуса во вне, в город, то монофункциональные пространства задают культуру для внутренних пользователей.

Третий тип пространств в иерархии — коммуникационные пространства. Они представляют собой места пересечения потоков разных функций

Табл. 1. Типология пространств кампусов

Table 1. Typology of campus spaces

Пространства для жизни Spaces for living	Пространства для образования, научной деятельности и работы Spaces for education, research and work	Пространства для города Spaces for a city
• общежития со студенческими апартаментами / dormitories with student apartments; • учебные комнаты / study rooms; • общие кухни-столовые на этажах shared kitchens and dining rooms; • общие гостиные для совместного досуга / shared living rooms for spending spare time; • спортивный и тренажерный залы sports grounds and gyms; • бассейн / pool; • уход за одеждой / clothes care; • комнаты для хранения / storage rooms; • парковки для велосипедов и самокатов / parking lots for bicycles and scooters; • приватный двор, терраса / private courtyard, terrace; • столовая и кафе / dining room and cafe	• лаборатории / laboratories; • учебные классы / classrooms; • офисы ППС и научного персонала offices of lecturers and researchers; • офисы компаний-резидентов offices of resident companies; • коворкинги / coworking spaces; • открытое пространство центрального лобби / open space of the central lobby; • комнаты для совещаний / meeting rooms; • консультационные центры consultation centers	• внутренний открытый двор и внешнее благоустройство / open courtyard and landscaping; • функциональное лобби главного корпуса / lobby of the main building; • библиотека / library; • конференц-зал / conference hall; • театральный зал / theater hall; • выставочный зал / showroom; • парк / park; • сеть пешеходных и велосипедных дорожек network of pedestrian and bicycle paths; • малые архитектурные формы и элементы искусства / hardscape and art elements



Рис. 1. Башня Maersk, здание факультета медицинских наук Копенгагенского университета

Fig. 1. University of Copenhagen's faculty of health and medical sciences



Рис. 2. Университет Боккони

Fig. 2. UNIBOCCONI



Рис. 3. Городской дом Кингстонского университета

Fig. 3. Kingston University Town House



Рис. 4. Кампус дизайна и искусств MOME

Fig. 4. Moholy-Nagy Művészeti Egyetem, MOME



Рис. 5. Образовательный центр Glasir

Fig. 5. Glasir Tórshavn College



Рис. 6. Нарвский учебный центр Эстонской академии наук безопасности

Fig. 6. Estonian Academy of Security Sciences

для искусственного создания ситуаций, подталкивающих к коммуникации (рис. 5). К таким типам пространства относятся: общие гостиные на этажах общежития; общая лестница, ведущая от образовательного и научного центра к выходу; библиотечные поинты на этажах; внутренний двор и внешнее благоустройство; остановки общественного транспорта.

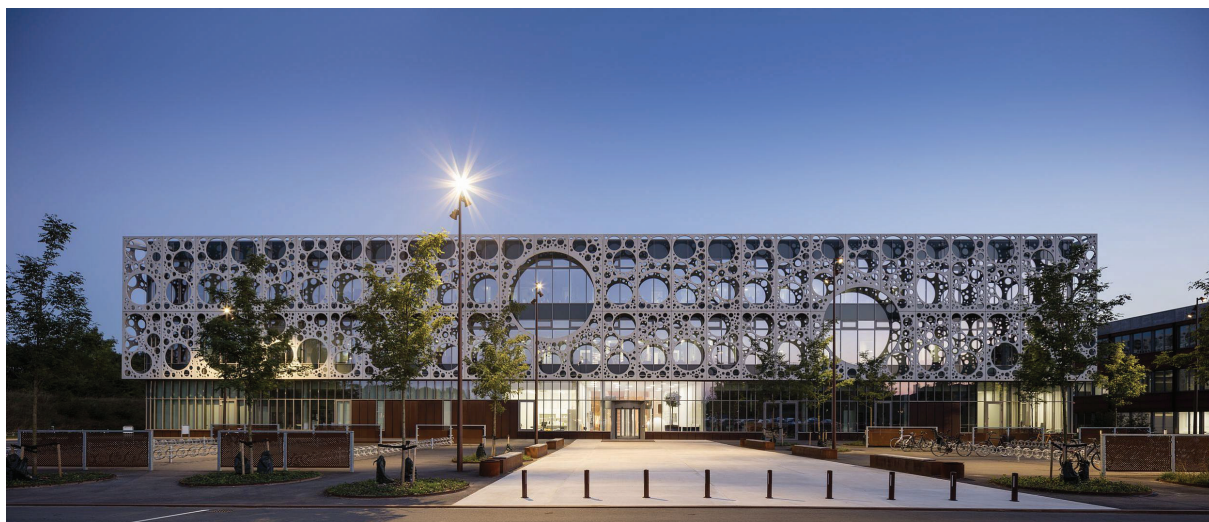


Рис. 7. Технический факультет Университета Южной Дании

Fig. 7. University of Southern Denmark

Принцип № 3. Идентичность пространств

Архитектурные приемы основных зданий кампуса несколько преобладают над особенностями ландшафта из-за его стилистического характера и масштаба (рис. 7). Баланс ландшафта и здания является одним из атрибутов, который делает среду кампуса такой запоминающейся. Необходимо поддерживать в равновесии соразмерность масштабов здания и ландшафта по мере развития и изменений кампуса. Такой диалог совместно с качеством и уникальными физическими атрибутами архитектуры делают место особенным и способствуют личностной идентификации человека с кампусом и университетом (рис. 8).

Идентичность пространств играет важную роль в определении институционального имиджа и образа кампуса (рис. 9). Качество ландшафтного и строительного дизайна имеет большое значение не только для внешнего вида кампуса, но и для восприятия и интеграции университета и окружающего сообщества. Это оказывает большое влияние на то, как возникают социальные взаимодействия, как люди перемещаются по кампусу, как воспринимается безопасность и как среда кампуса способствует усилению индивидуальной мотивации.

Таким образом, идентичность — также значимая основа для воспоминаний студентов, преподавателей, сотрудников и выпускников.

Принцип № 4. Специализация в архитектуре

Главные направления специализации кампуса в области науки и образования отражаются в архитектуре — форме зданий, цветах и фактуре фасадов и дизайне внутренних помещений (рис. 10). В случаях, когда кампус является центром города с ярко выраженным направлением в искусстве, используются элементы скульптуры, рельефа и орнамента в развитии ландшафта и архитектуры кампуса (рис. 11, 12). Любое такое произведение искусства,



Рис. 8. Мельбурнский университет

Fig. 8. University of Melbourne



Рис. 9. Студенческое жилье OurDomain, Амстердам

Fig. 9. OurDomain Student Housing

будь то отдельно стоящая скульптура, фонтан или орнамент на тротуаре площади, всегда должно быть тщательно интегрировано непосредственно в окружающий его ландшафт. Также специализация может быть отражена в фирменном знаке кампуса, шрифтовых и цветовых решениях. Сочетание данных трех элементов: архитектура снаружи и дизайн внутри; ландшафт; фирменный стиль бренда кампуса будут составлять единый считываемый почерк.



Рис. 10. Центр бизнес-инноваций Изенберг

Fig. 10. Isenberg School of Management Business Innovation Hub



Рис. 11. Европейская энергетическая академия

Fig. 11. Energy Academy Europe



Рис. 12. Университет Иннополис, Татарстан

Fig. 12. Innopolis University, Tatarstan

Принцип № 5. Библиотека как гостиная

Библиотеки начинают все активнее выполнять общественную функцию, впоследствии становясь центрами общественной жизни. В случаях небольших городов можно говорить, что библиотека — это гостиная города, место встречи разных аудиторий, площадка для проведения развивающего досуга. Пространства библиотеки разнообразны — изолированные и открытые, тихие и публичные, для чтения, работы с мобильными устройствами и групповых занятий различных видов (от настольных игр до лекций и семинаров, курсов по академическому письму и поиску информации); здесь могут располагаться кафе и детские комнаты (рис. 13, 14). Современная университетская библиотека предполагает и круглосуточный доступ для резидентов кампуса, одновременно способствуя обживанию этого пространства и более эффективному его использованию (рис. 15, 16). Сегодня библиотеки являются и источниками содержательной программы публичных мероприятий, что важно и для кампуса, на котором должны располагаться пространства для проведения открытых мероприятий.



Рис. 13. Библиотека Рахина Австралийского католического университета в Мельбурне

Fig. 13. Raheen Library at Australian Catholic University



Рис. 14. Библиотека Тоззера в Гарвардском университете

Fig. 14. Tozzer Library, Harvard University



Рис. 15. Библиотека кампуса университета Мелардален
Fig. 15. Library Mälardalen University Campus

Выводы относительно представленных принципов организации пространства университетов сделаны на основании того, что большинство проанализированных университетов, образы которых соответствуют понятию кампуса международного уровня, организованы на их базе (табл. 2).



Рис. 16. Библиотека кампуса Дальневосточного федерального университета
Fig. 16. Library, Far Eastern Federal University

На основе выполненного сопоставления можно заключить, что кампусы российских университетов совпадают с кампусами западных университетов в части реализации принципов иерархии и идентичности пространств. То есть как в российских, так и в западных кампусах проведено четкое разделе-

Табл. 2. Соответствие кампуса выделенным принципам организации пространства

Table 2. Compliance of the campus with the identified principles of space organization

Страна Country	Город City	Название Name	Год Year	П 1 P 1	П 2 P 2	П 3 P 3	П 4 P 4	П 5 P 5
Франция France	Париж Paris	Деревня Бельвиль (Национальная школа архитектуры Париж-Бельвиль) Belleville Village (National School of Architecture of Paris-Belleville)	2015					
США USA	Амхерст Amherst	Олимпия / Olympia Place	2016					
Швейцария Switzerland	Цюрих Zurich	Студенческое общежитие TWIST университета ETH в Цюрихе / TWIST/ETH Zurich	2016					
Нидерланды Netherlands	Эйндховен Eindhoven	Технический университет Эйндховена Eindhoven University of Technology	2016					
США USA	Чикаго Chicago	Кампус Норт Резиденшиал Чикагского университета / University of Chicago Campus North Residential Commons	2016					
Германия Germany	Берлин Berlin	Общежитие во Франкфуртер-Тор Apartments Frankfurter Tor	2017					
Германия Germany	Берлин Berlin	Мировой институт Совета по международным образовательным обменам / G27 CIEE Global Institute	2015					
США USA	Нью Йорк NY	Исследовательский центр New Lab / New Lab (New Lab tech cathedral)	2016					
Бельгия Belgium	Лювен Leuven	WOODS in Kessel-Lo WOODS в Кессель-Ло	2017					
Испания Spain	Барселона Barcelona	Кампус Марина (Резиденция Кампус Марина) / Campus Marina (TSH Campus Marina Residence)	2017					
Франция France	Париж Paris	CIL — резиденция Симоны Вейль CIL — Résidence Simone Veil	2018					
Франция France	Ренн Rennes	Творческий кампус IFFDEC / IFFDEC	2019					
Австралия Australia	Мельбурн Melbourne	Общежитие университета La Trobe / La Trobe University Student Accommodation	2020					
Дания Denmark	Копенгаген Copenhagen	Дом культуры Тингбьерг / Tingbjerg Culture House and Library	2018					
Великобритания Great Britain	Кентерберри Canterbury	Общежитие для иностранных студентов International College for The King's School	2019					

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Страна Country	Город City	Название Name	Год Year	П 1 P 1	П 2 P 2	П 3 P 3	П 4 P 4	П 5 P 5
Германия Germany	Вупперталь Wuppertal	Апартаменты у Вуппертала / Variowohnen Wuppertal Student Housing	2020					
США USA	Нью-Хейвен New Haven	Инновационный центр Йельского Университета / The Yale University Center for Innovative Thinking	2020					
Эстония Estonia	Нарва Narva	Учебный центр академии наук по безопасности / Estonian Academy of Security Sciences	2020					
Дания Denmark	Роскилле Roskilde	Народная школа Roskilde Festival / Roskilde Festival Folk High School	2019					
Чехия Czech	Прага Prague	Коливинг The Fizz / Co-living The Fizz	2020					
Нидерланды Netherlands	Амстердам Amsterdam	Студенческое жилье OurDomain Student Housing	2021					
Швейцария Switzerland	Женева Geneva	Общежитие Grand Morillon / Grand Morillon student residence	2021					
Нидерланды Netherlands	Амстердам Amsterdam	Минервахейвен / Student Experience Minervahaven	2021					
Финляндия Finland	Отаниеми Otanienemi	Университет Аалто / Aalto University	2020					
Великобритания Great Britain	Оксфорд Oxford	Оксфордский университет. Центр бизнеса Oxford University Centre for Business Taxation	2020					
Швеция Sweden	Стокгольм Stockholm	Королевский технологический институт. Новое здание / KTH Royal Institute of Technology in Stockholm. Architecture School	2020					
Нидерланды Netherlands	Роттердам Rotterdam	Университет им. Эразма Роттердамского Erasmus University Rotterdam	2021					
Австралия Australia	Мельбурн Melbourne	Мельбурнский университет / University of Melbourne	2021					
Италия Italy	Милан Milan	Университет Боккони / UNIBOCCONI	2018					
Ирландия Ireland	Дублин Dublin	Кампус Грейнджгорман (TU Dublin) Grangegorman campus, TU Dublin	2019					
Венгрия Hungary	Будапешт Budapest	Кампус дизайна и искусств MOME / Moholy-Nagy Művészeti Egyetem, MOME	2017					
Дания Denmark	Оденсе Odense	Технический факультет SDU / University of Southern Denmark	2015					
США USA	Кембридж Cambridge	Библиотека Тоззера в Гарвардском университете / Tozzer Library, Harvard University	2014					
Португалия Portugal	Мельгашу Melgasho	Спортивный кампус Monte Prado / Sport campus Monte Prado	2014					
Испания Spain	Барселона Barcelona	Центр искусства и дизайна Escola Massana Escola Massana, Arts and Design school	2017					
Великобритания Great Britain	Бристоль Bristol	Инженерный факультет UWE / University of the West England	2017					
Шотландия Scotland	Эдинбург Edinburgh	Инновационный центр Байеса / University of Edinburgh	2018					
Фарерские острова Faroe Island	Торсхавн Torshavn	Образовательный центр Glasir / Glasir Tórshavn College	2018					
Канада Canada	Торонто Toronto	Инженерный центр Myhal / Myhal Centre for Engineering Innovation & Entrepreneurship	2018					
Дания Denmark	Копенгаген Copenhagen	Башня Maersk / University of Copenhagen's Faculty of Health and Medical Sciences	2017					
Нидерланды Netherlands	Гронинген Groningen	Европейская энергетическая академия Energy Academy Europe	2019					
Великобритания Great Britain	Дарем Durham	Центр обучения Лоуэр Маунтджой / Lower Mountjoy Teaching and Learning Centre	2019					
Австралия Australia	Бервуд Burwood	Юридическая школа Дикина в Бервуде Deakin Law School Building	2020					

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Страна Country	Город City	Название Name	Год Year	П 1 P 1	П 2 P 2	П 3 P 3	П 4 P 4	П 5 P 5
США USA	Амхерст Amherst	Центр бизнес-инноваций Изенберг / Isenberg School Of Management Business Innovation Hub	2019					
Австрия Austria	Вена Vienna	Библиотека и центр семинаров BOKU University Library and University Archive	2020					
Великобритания Great Britain	Лондон London	Городской дом Кингстонского университета Kingston University Town House	2020					
США USA	Корваллис Corvallis	Лесной научный комплекс OSU OSU Corvallis Campus	2020					
Финляндия Finland	Хельсинки Helsinki	Университет искусств Uniarts / University of the Arts Helsinki	2021					
США USA	Бостон Boston	Гарвардский научно-технический комплекс Harvard University Science and Engineering Complex	2021					
Канада Canada	Виннипег Winnipeg	Инженерное здание Стенли Поли / Stanley Pauley Engineering Building	2021					
Швеция Sweden	Эскилтуна Eskilstuna	Кампус университета Мелардален Mälardalen University Campus Eskilstuna	2020					
Дания Denmark	Хорсенс Horsens	Кампус Университета VIA в Хорсенсе VIA University College Campus Horsens	2021					
Россия Russia	Красноярск Krasnoyarsk	Сибирский федеральный университет Siberian Federal University	2012					
Россия Russia	Владивосток Vladivostok	Дальневосточный федеральный университет Far Eastern Federal University	2011					
Россия Russia	Иннополис Innopolis	Университет Иннополис / Innopolis University	2012					
Россия Russia	Москва Moscow	Сколковский институт науки и технологий Skolkovo Institute of Science and Technology	2019					

ние между учебными и исследовательскими зонами и пространствами для отдыха и общения. Однако, в отличие от европейской или североамериканской моделей кампусов, в большинстве университетов России не до конца реализована концепция библиотеки как гостиной, также наблюдается недостаток пространств внеучебного назначения, которые выступают альтернативной площадкой для общения с однокурсниками и преподавателями. Так, например, студенческое общежитие в России обладает лишь жилой функцией, в отличие от его расширенной роли в европейских кампусах, когда общежитие может быть еще зоной коворкинга, самообразования, обсуждения студенческих проектов и местом для отдыха. Кроме того, кампусы российских университетов лишены специализации в архитектуре и часто проводят строгую границу между университетской территорией и городом, ограничивая свою посещаемость кругом студентов и преподавателей университета.

Не все университеты, которые были рассмотрены в рамках данного исследования, соответствуют всем 5 принципам. В большинстве случаев можно наблюдать совпадение по 3–4 принципам. Однако повторяемость этих принципов позволяет сделать вывод об их универсальности и необходимости учета при организации пространств современных российских кампусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование принципов проектирования кампусов, реализованных в последние 15 лет, показало наличие устойчивого паттерна как суммы пяти принципов, которые отражаются в организации пространств. Три из них демонстрируют принципиальное отличие, которое определяет кампус как современный.

Первое и главное отличие — открытость. Параметр открытости подразумевает не только наличие функций и пространств, куда имеют доступ жители, но в большей степени планировочной структуры и прозрачных решений в архитектуре. Планировочная структура выстроена таким образом, что бульварная и пешеходная городская сеть пронизывает кампус и делает его проницаемым. Внутренний двор и кампусный парк перестают быть элитарным местом, доступным только для университетов. Их функция меняется. От места, которое раньше было предназначено для неспешных прогулок и диалогов, оно превращается в место для городского досуга. Но российские университеты сформированы и по прямо противоположному принципу — закрытости, что отдаляет их от любой формы коммуникации с городом. Данный принцип является историческим следствием воплощения социокультурной модели «дворец науки», в основу которого

положена элитарность и доминирование университетской жизни над городской.

Второе отличие связано с переосмыслением монофункциональных пространств. Образовательные залы, лаборатории, библиотека не теряют своей главной функции; при них начинают проектироваться места для коммуникаций, совместного времяпрепровождения. В целом одиночество, изолированность, элитарность исключаются из принципов проектирования. Элитарность формируется не за счет закрытости и отгороженности, а за счет формирования бренда, который в свою очередь основывается на репутации результатов работы университета самого по себе и университета с городским сообществом. В российских университетах укреплена модель монофункциональных пространств. Это связано напрямую с четким разделением базовых процессов — образование, исследование, практические разработки и административной функций, разные проректоры и аппараты администрирования.

Третье отличие — формообразующие элементы зданий. Классическая строгая архитектура в современных кампусах заменяется современными решениями. Под классической архитектурой автор подразумевает архитектуру, которая реконструирована

из принципов греческой и римской архитектуры классической древности. Современная архитектура кампусов отличается четкими линиями, отсутствием орнаментов, акцентом на строительные материалы и высокой долей остекления. Отдельно следует отметить вход в здание кампуса. Если классическая архитектура предполагает наличие лестницы, которая как в храм ведет посетителя ко входу в университет, то в современном исполнении вход в кампус находится с уровня земли, максимально упрощая доступ в здание.

Таким образом, представленное исследование основных принципов проектирования современных кампусов позволяет говорить о возникновении нового подхода к созданию пространств для университетов и кампусов. В инновационной экономике университетам принадлежит ключевая роль в обеспечении инновационного развития, подготовке необходимых ключевых компетенций для достижения технологического рывка [25]. Пространство кампуса служит важным условием для реализации данной модели. Организация пространства кампуса выражает модель взаимодействия базовых процессов, открытую или закрытую позицию университета относительно города и его запросов и является воплощением управленческой культуры университета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Стариков А.А.* Культура пространственной организации как фактор конкурентоспособности университета // Университетское управление: практика и анализ. 2011. № 2 (72). С. 15–29. EDN NYONIH.

2. *Исаева Н.В., Борисова Л.В.* Сравнительный анализ национальных политик по развитию кампусов исследовательских университетов // Университетское управление: практика и анализ. 2013. № 6 (88). С. 74–87. EDN RWUSVB.

3. *Моторина Ю.В., Москвин Н.А.* Формирование пространства университетских кампусов с целью создания благоприятных условий с учетом современных требований и развития в структуре города // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2013. № 5. С. 76–85. EDN SDLVQF.

4. *Берестова А.В.* Исторические предпосылки создания университетских кампусов и анализ тенденций развития // Российские регионы в фокусе перемен : сб. докл. XI Междунар. конф. 2016. С. 210–216. EDN ZFMVXX.

5. *Пучков М.В.* Университетский кампус: взаимосвязи образовательных технологий и моделей формирования архитектурного пространства // Университетское управление: практика и анализ. 2021. Т. 25. № 4. С. 109–119. DOI: 10.15826/umpra.2021.04.039. EDN KPYQVH.

6. *Палей Е.С.* Современные университетские кампусы Европы. Организация общественного пространства : дис. ... канд. арх. М., 2021. 247 с.

7. Университетские кампусы и город: кооперация ради конкурентоспособности. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/3f0/kbpm276p3tau6knldla3d6ozz0fve0e.pdf>

8. *Пучков М.В.* Университетский кампус. Принципы создания пространства современных университетских комплексов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 3 (32). С. 79–88. EDN OEDUUX.

9. *Дадданова И.Б.* Университетский кампус как пространство социального взаимодействия (на примерах современных кампусов зарубежья) // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 1 (12). С. 127–137. EDN TQMJZD.

10. *Пучков М.В.* Опыт пространственной организации современных университетских комплексов // Университетское управление: практика и анализ. 2011. № 2 (72). С. 30–39. EDN NYONIR.

11. *Долотказина Н.С., Прыткова Ю.П.* Принципы проектирования студенческих кампусов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2016. № 1–2 (15–16). С. 9–15. EDN WHFWPN.

12. *Лазарев Г.И.* Формирование архитектурно-пространственной среды университета: опыт ВГУЭС //

Университетское управление: практика и анализ. 2011. № 2 (72). С. 6–14. EDN NYONHN.

13. Саввинов В.М. Подходы к формированию современной образовательной среды, отвечающей критериям assessment system for sustainable campus // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Педагогика. Психология. Философия. 2021. № 4 (24). С. 92–99. EDN LWOFHM.

14. Ремизова Т.С., Алаев А.А. Университетские кампусы мирового уровня как новая форма организации образовательных пространств на территории Российской Федерации // Университетское управление: практика и анализ. 2023. Т. 27. № 2. С. 101–115. DOI: 10.15826/umpra.2023.02.016. EDN UJTFED.

15. Флоря В.М., Флоря М.В., Лапёнок А.С. Университетский кампус и городская среда // Научные междисциплинарные исследования : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 169–176. EDN YKFZNP.

16. Кулешова Г.И. Университет и город. Очерк эволюции связи университетской институции с городской средой. Часть II. Особенности формирования российских университетов, современное состояние, модель межуниверситетского кампуса // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 1. С. 115–123. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-1-115-123. EDN YWPTKA.

17. Пучков М.В. Стратегии развития урбанизированных территорий: кампусные модели как средство управления региональным развитием // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. № 1. С. 25–29. EDN NORKZF.

18. Митряшкина А.А., Ковалева Т.В. Исследование роли межвузовского кампуса в формировании социальной инфраструктуры региона // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 4–2 (98). С. 66–70.

DOI: 10.24412/2411-0450-2023-4-2-66-70. EDN YNRNLU.

19. Геревенко О.Ю., Ковалева Т.В. Оценка потенциала развития межвузовского кампуса города Хабаровска как центра региональной экосистемы // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 4–1 (98). С. 79–83. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-4-1-79-83. EDN AGMPIV.

20. Федотова М.А., Беляева И.Ю., Лосева О.В., Калачев Д.Н., Кухтин П.В., Пухова М.М. и др. Развитие системы управления имущественным комплексом университетских кампусов: лучшие российские и зарубежные практики : монография. М. : Русайнс, 2017. 144 с. EDN ZASETD.

21. Низамутдинова З.Ф. Разработка модели архитектурно-ландшафтного каркаса университетского кампуса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 10 (105). С. 144–150. EDN VCPCPT.

22. Пасько О.А. Особенности землеустройства и тенденции развития кампусов // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 147–153. EDN RSEQXL.

23. Зобова М.Г. Современные аспекты архитектурно-градостроительного проектирования университетских кампусов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 3 (178). С. 243–248. EDN UFZJJV.

24. Пригаро С.В. Подходы и методы управления университетскими кампусами // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 1 (39). С. 133–139. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-39-1-133-139. EDN ESUECL.

25. Кулешова Г.И. Университет и город. Очерк эволюции связи университетской институции с городской средой. Часть 1 мировой опыт // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 4. С. 70–79. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-70-79. EDN QDEECB.

Поступила в редакцию 11 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 5 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 5 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Ольга Олеговна Донская — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; директор по социальному развитию; **Группа «Родина»;** 127006, г. Москва, ул. Малая Дмитровка, д. 20; ORCID: 0009-0002-2159-8665; o.donskaya@gmail.com;

Татьяна Николаевна Кисель — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-2017, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru.

Вклад авторов:

Донская О.О. — написание аннотации, введения, материалов и методов, результатов исследования, заключения.

Кисель Т.Н. — написание аннотации, введения, составление списка литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Pouchkov M.V. The culture of spatial organization as a factor of competitiveness of university. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2011; 2(72):15-29. EDN NYONIH. (rus.).
2. Isaeva N.V., Borisova L.V. Comparative analysis of national policies for developing research universities campuses. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2013; 6(88):74-87. EDN RWUSVB. (rus.).
3. Motorina Y.V., Moskvina N.A. Space planning of university campus in order to provide environment considering modern requirements in city structure. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2013; 5:76-85. EDN SDLVQF. (rus.).
4. Berestova A. Historical prerequisites of university campuses creation and development trend analysis. *Russian Regions in the Focus of Changes: XI International Conference*. 2016; 210-216. EDN ZFMVXX. (rus.).
5. Puchkov M.V. University campus: interrelations of educational technologies and models of architectural space formation. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2021; 25(4):109-119. DOI: 10.15826/umpa.2021.04.039. EDN KPYQVH. (rus.).
6. Palej E.S. *Modern university campuses in Europe. Organization of public space Modern university campuses in Europe. Organization of public space : dissertation ... cand. architecture*. Moscow, 2021; 247. (rus.).
7. *University campuses and the city: cooperation for competitiveness*. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/3f0/kbpm276p3tau6knldla3d6oz0fve0e.pdf> (rus.).
8. Puchkov M.V. University campus. Principles of architectural and urban design for modern university complexes. *Journal of Construction and Architecture*. 2011; 3(32):79-88. EDN OEDUUX. (rus.).
9. Dagdanova I.B. University campus as the area of sociable collaboration (at the examples of modern foreign campuses). *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2015; 1(12):127-137. EDN TQMJZD. (rus.).
10. Pouchkov M.V. Experience of architectural and urban design for modern university complexes. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2011; 2(72):30-39. EDN NYONIR. (rus.).
11. Dolotkazina N.S., Prytkova Yu.P. Principles for the design of student campuses. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2016; 1-2(15-16):9-15. EDN WHFWPN. (rus.).
12. Lazarev G.I. Organizing of architectural environment of the university: VSUES experience. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2011; 2(72):6-14. EDN NYONHN. (rus.).
13. Savvinov V.M. Approaches to the formation of a modern academic environment meeting the criteria of assessment system for sustainable campus. *Bulletin of the North-East Federal University named after M.K. Ammosov*. 2021; 4(24):92-99. EDN LWOFHM. (rus.).
14. Remizova T.S., Alaev A.A. World-class university campuses as a new form of organization of educational spaces on the territory of the Russian Federation. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2023; 27(2):101-115. DOI: 10.15826/umpa.2023.02.016. EDN UJTFFD. (rus.).
15. Floria V.M., Floria M.V., Lapenok A.S. University campus and city environment. *Scientific Interdisciplinary Research : collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference*. 2020; 169-176. EDN YKFZNP. (rus.).
16. Kuleshova G.I. The university and the city. Essays on evolution of connection between university institution and urban environment. Part II. Peculiarities of Russian universities formation, modern condition, model of interuniversity campus. *Academia. Architecture and Construction*. 2022; 1:115-123. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-1-115-123. EDN YWPTKA. (rus.).
17. Puchkov M.V. Development strategies for urban areas: campus models as a means of managing regional development. *Akademicheskij Vestnik UralNII-proekt RAASN*. 2011; 1:25-29. EDN NORKZF. (rus.).
18. Mitryashkina A.A., Kovaleva T.V. Analysis of the role of the intercollegiate campus in formation of the social infrastructure of the region. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2023; 4-2(98):66-70. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-4-2-66-70. EDN YNRNLU. (rus.).
19. Gerevenko O.Y., Kovaleva T.V. Assessment of the development potential of the Khabarovsk intercollegiate campus as the center of the regional ecosystem. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2023; 4-1(98):79-83. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-4-1-79-83. EDN AGMPIV. (rus.).
20. Fedotova M.A., Belyaeva I.Yu., Loseva O.V., Kalachev D.N., Kukhtin P.V., Pukhova M.M. et al. *Development of a system for managing the property complex of university campuses: best Russian and foreign practices : monograph*. Moscow, Rusayns, 2017; 144. EDN ZASETD. (rus.).
21. Nizamutdinova Z. Developing a university campus architectural and landscape framework model. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015; 10(105):144-150. EDN VCPCPT. (rus.).
22. Pas'ko O.A. Features of land management and trends in campus development. *Journal of Mining Institute*. 2013; 204:147-153. EDN RSEQXL. (rus.).
23. Zobova M.G. Modern principles of architectural and urban designing of university campuses. *Vestnik*

of the Orenburg State University. 2015; 3(178):243-248. EDN UFZJJV. (rus.).

24. Prigaro S.V. Approaches and methods of management of university campuses. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2022; 1(39):133-139. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-39-1-133-139. EDN ESUECL. (rus.).

25. Kuleshova G.I. The university and the city. Essays on evolution of connection between university institution and urban environment: world practice, peculiarities, aims and tasks of native practice. *Academia. Architecture and Construction*. 2021; 4:70-79. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-70-79. EDN QDEECB. (rus.).

Received October 11, 2023.

Adopted in revised form on April 5, 2024.

Approved for publication on April 5, 2024.

BIONOTES: **Olga O. Donskaya** — 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; Director of Social Development; **Rodina Group**; 20 Malaya Dmitrovka st., Moscow, 127006, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-2159-8665; o.donskaya@gmail.com;

Tatiana N. Kisel — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, 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: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-2017, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Olga O. Donskaya — abstract, introduction, research materials and methods, research results, conclusion and discussion.

Tatiana N. Kisel — abstract, introduction, references.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 332.12:332.81

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1201-1216

Межстрановые оценки состояния жилищной сферы на основе развития методологии компаративного анализа

Татьяна Юрьевна Овсянникова, Ольга Валерьевна Рабцевич

Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ); г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются межстрановые компаративные исследования жилищной сферы, позволяющие квантифицировать неоднородность пространственного развития и ранжировать различные территориальные экономические системы. Цель исследования — сравнительная оценка стран мира по состоянию и уровню развития жилищной сферы, а также оценка ситуации и выявление проблем в жилищной сфере России по сравнению с другими странами мира. Объект изучения — жилищная сфера, предмет — жилищные отношения.

Материалы и методы. В основу положена методология компаративных исследований. Выделены четыре концептуальных подхода к выполнению компаративных сопоставлений жилищной сферы: на базе концепции устойчивого развития поселений, концепции воспроизводства жилища, концепции анализа ex post – ex ante и концепции жизненного цикла объектов жилой недвижимости. Систематизированы жилищные индикаторы, используемые для компаративных сопоставлений жилищной сферы в рамках четырех выявленных концептуальных подходов, а также проанализированы методы компаративных исследований в жилищной сфере. Показано, что одним из наиболее универсальных и информативных в целях компаративных исследований является индексный метод.

Результаты. Апробирован подход к выполнению межстрановых компаративных сопоставлений в рамках концепции устойчивого развития на основе индексного метода. Компаративные исследования жилищной сферы выполнены посредством определения интегрального жилищного индекса, агрегированных индексов адекватности жилища и жилой среды и агрегированного индекса доступности жилья. Расчет интегральных характеристик жилищной сферы показал существенную страновую дифференциацию уровня развития жилищной сферы и позволил проанализировать качество жилищных условий в странах мира.

Выводы. Расширена методология компаративных исследований жилищной сферы, предложенные методологические подходы к выполнению компаративных исследований достаточно универсальны и могут быть применены для выполнения как межстрановых, так и межрегиональных сопоставлений. Результаты компаративных исследований могут стать основой выработки государственной политики пространственного выравнивания развития территориальных жилищных систем, а также формирования жилищной политики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жилищная сфера, компаративные исследования, межстрановые сопоставления, адекватность жилища, доступность жилища, устойчивое развитие, воспроизводство жилища, жизненный цикл жилища

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Овсянникова Т.Ю., Рабцевич О.В. Межстрановые оценки состояния жилищной сферы на основе развития методологии компаративного анализа // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1201–1216. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1201-1216

Автор, ответственный за переписку: Ольга Валерьевна Рабцевич, antrea85@yandex.ru.

Cross-country assessments of the housing sector based on the development of comparative analysis methodology

Tatiana Yu. Ovsiannikova, Olga V. Rabtsevich

Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB); Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses cross-country comparative studies of the housing sector. Comparative studies allow quantifying the heterogeneity of spatial development and ranking various territorial economic systems. The purpose of the work is a comparative assessment of the countries of the world according to the state and level of development of the housing sector, as well as an assessment of the situation and identification of problems in the housing sector of Russia in comparison with other countries of the world. The object of the study is the housing sector, and the subject of the study is housing relations.

Materials and methods. The work is based on the methodology of comparative studies. The authors of the article have identified four conceptual approaches to the implementation of comparisons in the housing sector: based on the concept of sustainable development of settlements, the concept of reproduction of housing, the concept of analysis ex post – ex ante and the concept of the life cycle of residential real estate. The study systematizes housing characteristics used for comparisons in the housing sector within the framework of four identified conceptual approaches. Methods of comparative research in the housing sector are analyzed in the article. It is shown that the index method is a most universal and informative one for the purposes of comparative research.

Results. In this study, the authors tested an approach to cross-country comparisons within the framework of the concept of sustainable development based on the index method. Comparative studies of the housing sector were performed by determining the integral housing index, aggregated indices of housing and living environment adequacy, and the aggregated housing affordability index. The analysis of integral characteristics of the housing sector showed a great difference between countries in terms of the level of development of the housing sector and allowed analyzing the quality of housing conditions in the countries of the world.

Conclusions. The study allowed to expand the methodology of comparative studies of the housing sector. The proposed methodological approaches to the implementation of comparative studies are quite universal and can be applied to cross-country and interregional comparisons. Results of comparative studies can become the basis for (1) a state policy of spatial alignment in terms of the development of territorial housing systems and (2) the housing policy formulation.

KEYWORDS: housing sector, comparative studies, cross-country comparisons, housing adequacy, housing accessibility, sustainable development, housing reproduction, housing life cycle

FOR CITATION: Ovsiannikova T.Yu., Rabtsevich O.V. Cross-country assessments of the housing sector based on the development of comparative analysis methodology. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1201-1216. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1201-1216 (rus.).

Corresponding author: Olga V. Rabtsevich, antrea85@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нарастания пространственной социально-экономической неоднородности особое значение приобретают исследования, направленные на выявление и элиминирование диспропорций территориального развития. Изучение пространственной структуры экономики является предметом исследования многих отечественных и зарубежных ученых. Такие исследования позволяют выявить причины и следствия неравномерности глобального и регионального социально-экономического развития, обнаружить проблемные узлы и точки роста территориальных экономик и обосновать стратегии пространственного развития. Практическая реализация результатов таких исследований позволит достичь целей сокращения неравенства пространственного развития, что заложено в качестве одной из глобальных целей стратегического плана ООН-Хабитат на период 2020–2023 гг.¹

В основе исследований пространственного социально-экономического развития лежит, как правило, методология компаративного анализа, позволяющая квантифицировать пространственную неоднородность — выявить диспропорции, количественно измерить различия и ранжировать территории (страны, регионы). На основе методологии компаративного анализа строятся различные рейтинговые системы: оценки качества жизни населения², уровня бедности³, индекса устойчивого

развития⁴, уровня человеческого развития⁵, уровня городского развития и качества городской среды⁶, уровня инновационного развития⁷ и т.д.

Интерес к компаративным исследованиям и широкому применению различных рейтинговых систем был обусловлен, с одной стороны, нарастанием глобального пространственного социально-экономического неравенства, с другой стороны, ростом межстрановой и межрегиональной конкуренции. И, несмотря на продолжающиеся дискуссии о том, можно ли считать метод сравнения полноценным методом научного познания, способным генерировать новую теорию [1], он широко применяется в современной экономической науке [2–4].

Развитие теории и методологии компаративных исследований расширяет теоретическую базу и методологический инструментарий формирования государственной политики пространственного развития и механизмов государственного регулирования в различных сферах экономической деятельности и на разных уровнях управления государством.

Одна из сфер экономики, наиболее чувствительная к неоднородности пространственного раз-

¹ The Strategic Plan 2020-2023 // UN-Habitat. URL: https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-09/strategic_plan_2020-2023.pdf

² Quality of Life Index by Country 2021 // NUMBEO. URL: https://www.numbeo.com/quality-of-life/rankings_by_country.jsp?title=; OECD Better Life. URL: <https://www.oecdbetterlifeindex.org/#/11111111111>

³ 2023 Global Multidimensional Poverty Index (MPI) // United Nations Development Programme. 2023. URL: <https://hdr.undp.org/content/2023-global-multidimensional-poverty-index-mpi/#/indicies/MPI>

⁴ Rankings // Sustainable Development Report. URL: <https://dashboards.sdgindex.org/rankings>

⁵ Human Development Report 2020 // Human Development Reports. United Nations Development Programme. URL: <https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2020>

⁶ World Cities Report 2020. The Value of Sustainable Urbanization // United Nations Human Settlements Programme. URL: https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/11/world_cities_report_2020_abridged_version.pdf; UN-HABITAT City Prosperity Index. A Comparison of 29 World Cities. Methodology and Results of a Comparative Analysis of Cities // United Nations Human Settlements Programme. URL: https://windowstorussia.com/wp-content/uploads/2022/02/Global_Cities_Ranking_Draft_REPORT_Feb_2022.pdf

⁷ Global Innovation Index 2018. Energizing the World with Innovation // Cornell University, INSEAD, and WIPO. 2018. URL: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2018.pdf

вития, — жилищная. Роль жилищной сферы в экономике — жилище есть фактор воспроизводства человеческого капитала, ситуация в жилищной сфере определяет динамику демографических и миграционных процессов и отражает уровень развития экономических систем в целом — обуславливает актуальность ее пространственного анализа.

Данное исследование посвящено проблеме формирования и развития методологии межстранового компаративного анализа жилищной сферы. *Содержанием компаративных исследований жилищной сферы является сравнительная оценка разных территориальных экономических систем по состоянию и уровню развития жилищной сферы и выявление узловых проблем в ее функционировании*, что, в свою очередь, в дальнейшем позволит обозначить направления совершенствования государственной жилищной политики. Компаративные исследования жилищной сферы позволяют охарактеризовать сбалансированность ее развития на разных уровнях экономики и оценить эффективность жилищной политики в странах мира.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Компаративным исследованиям жилищной сферы и оценкам жилищного неравенства посвящены работы многих отечественных [5–11] и зарубежных ученых [12–18]. Они вносят значительный вклад в развитие теории и методологии компаративных исследований применительно к жилищной сфере. Исследования на основе компаративного анализа выполняются также экспертами многих международных организаций — ООН-Хабитат, OECD и др. При этом применяются различные методологические подходы, разные системы индикаторов и базы данных.

Это определяет некоторую фрагментарность исследований и не позволяет комплексно оценить состояние и уровень развития жилищной сферы для различных территориальных экономических систем. В связи с этим возникает необходимость систематизации методологических подходов и развития методического инструментария компаративных исследований жилищной сферы.

При выполнении компаративных исследований жилищной сферы могут быть использованы разные теоретические концепции и методологические подходы. Выбор теоретической базы и методологического инструментария зависит от объекта, предмета и цели компаративных исследований.

По мнению авторов, в основу методологии выполнения компаративных исследований жилищной сферы могут быть положены четыре основных концептуальных подхода (рис. 1): концепция устойчивого развития поселений, концепция воспроизводства жилища, концепция анализа ex post и ex ante и концепция жизненного цикла (ЖЦ) объектов жилой недвижимости.

В рамках каждой концепции может быть сформирован свой категориальный аппарат, система те-

оретических и методологических принципов, методов и инструментов исследования и своя система индикаторов, позволяющих квантифицировать состояние и уровень развития жилищной сферы.

Целью выполнения компаративных исследований является сравнительная оценка территориальных систем по состоянию и уровню развития жилищной сферы, объектом исследования выступает жилищная сфера, предметом исследования — жилищные отношения. Несмотря на то что исследования в рамках всех четырех концепций объединены общей целью, общим объектом и предметом (рис. 1), содержание компаративного анализа в рамках каждой концепции различно, как и используемые методы и инструменты построения сравнительных оценок и системы жилищных индикаторов.

Каждый концептуальный подход решает разные задачи компаративных исследований. Концепция устойчивого развития предполагает выполнение компаративных исследований жилищной сферы с точки зрения соответствия требованиям Программы ООН по населенным пунктам (ООН-Хабитат). Согласно этой Программе, достижение целей устойчивого развития требует соответствия жилья двум основополагающим характеристикам — адекватности жилища и его доступности [19]. Концепция устойчивого развития предполагает оценку адекватности и доступности существующего или вновь построенного жилья, но может быть расширена и на инвестиционную стадию, включая оценку устойчивости жилищного строительства [20, 21].

Концепция воспроизводства жилища предполагает выполнение компаративных сопоставлений с точки зрения непрерывности и расширенности воспроизводственного процесса в жилищной сфере, сбалансированности процессов на отдельных фазах воспроизводственного цикла. Этот подход позволяет оценить состояние и динамику жилищного фонда, тип и формы его воспроизводства как части национального богатства.

Концепция анализа ex post и ex ante предполагает выполнение компаративных сопоставлений с точки зрения фактического состояния и достигнутого уровня развития жилищной сферы с оценкой преобладающих трендов, причинно-следственных связей и потенциала роста. Как показывает анализ научной литературы, подавляющее большинство исследователей жилищной сферы ограничиваются подходом ex post, анализируя статистические показатели, характеризующие состояние жилищной сферы на текущий момент.

Компаративные исследования на основе концепции ЖЦ предполагают сравнительный анализ жилищной сферы территорий с точки зрения управления ЖЦ жилых зданий (продолжительностью ЖЦ жилища, стоимостью, ресурсоемкостью, энергоэффективностью, техническим состоянием жилых зданий, реновационными процессами и т.д.).

Основной методологической сложностью при выполнении межстрановых компаративных иссле-

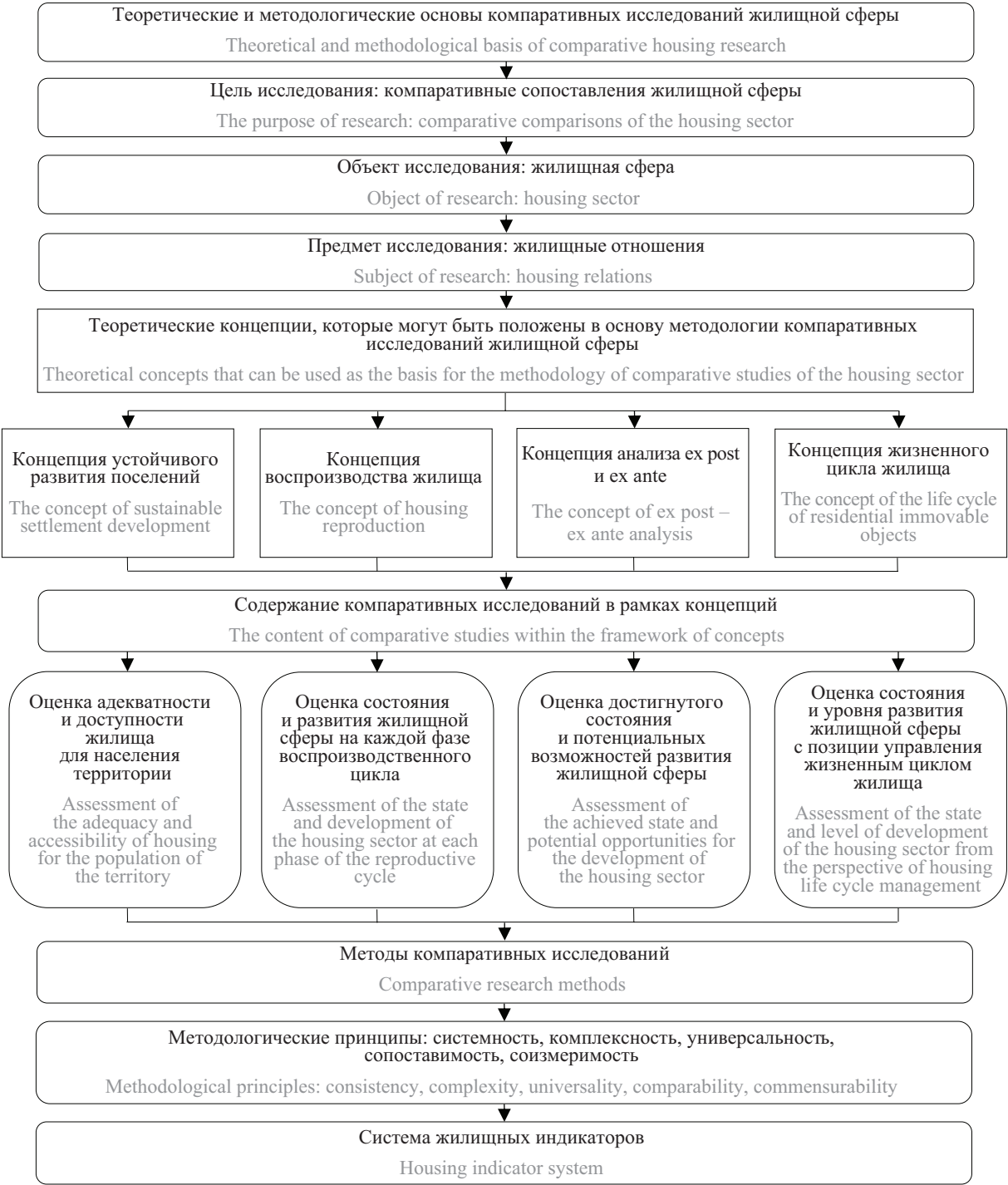


Рис. 1. Содержание концептуальных подходов, которые могут быть положены в основу методологии компаративных исследований жилищной сферы

Fig. 1. The content of conceptual approaches that can be used as the basis for the methodology of comparative studies of the housing sector

дований является обеспечение сопоставимого набора жилищных индикаторов, по которым ведется статистическое наблюдение и формирование открытых баз данных. Как справедливо отмечают исследователи [10], информационная асимметрия, связанная с тем, что в каждой стране формируется свой набор статистических показателей и аналитических дан-

ных, становится главной проблемой межстрановых компаративных исследований.

Поэтому в основу предлагаемой в данной работе методологии межстрановых компаративных исследований были положены принципы сопоставимости, соизмеримости, комплексности и универсальности статистических и оценочных по-

казателей, являющихся индикаторами состояния и развития жилищной сферы.

Система жилищных индикаторов сформирована на основе анализа различных баз статистических данных и исследований международных организаций, научных трудов российских и зарубежных ученых. Жилищные индикаторы, систематизированные по обозначенным выше четырем методологическим подходам, приведены в табл. 1.

Соответственно решаемым задачам в научных исследованиях могут быть использованы различные методы анализа. Для оценки состояния и уровня

Табл. 1. Жилищные индикаторы, которые могут быть использованы для межстрановых компаративных исследований жилищной сферы в рамках различных концептуальных подходов⁸

Table 1. Housing indicators that can be used for cross-country comparative studies of the housing sector within the framework of various conceptual approaches⁸

Жилищный индикатор Housing indicator	Базы данных Data bases	Концепция устойчивого развития The concept of sustainable development	Концепция воспроизводства / The concept of housing reproduction	Концепция анализа ex post и ex ante / The concept of ex post ex ante analysis	Концепция жизненного цикла The concept of the life cycle of residential units
Показатели качества и количества жилища Indicators of the quality and quantity of housing					
1. Городское население страны, живущее в трущобах / Proportion of urban population living in slums (percent)	UN HABITAT, World Bank	+	–	–	–
2. Жилища, оборудованные базовыми видами благоустройства / Dwellings with basic amenities	UN HABITAT, OECD	+	–	+	+
3. Количество комнат на человека / Rooms per person	UN HABITAT, OECD, Eurostat	+	–	+	+
4. Средняя обеспеченность жильем / Average floor area (space) occupied by one person in a household	Eurostat ⁹ , HOFINET ¹⁰	+	–	+	+
5. Средний размер жилища / Living floor space per dwelling	Eurostat ⁹ , HOFINET ¹⁰	+	–	+	+
6. Число жилищ на 1000 чел. населения страны / Number of dwellings per thousand inhabitants	OECD, HOFINET (число жилищ ¹⁰ number of dwellings ¹⁰)	+	–	+	+
7. Тип жилья, занимаемого домохозяйством Occupied residential dwelling types (% of the occupied residential stock)	OECD, Eurostat	+	–	+	–
8. Доля домохозяйств, находящихся в стесненных жилищных условиях (домохозяйства с более чем одним человеком на комнату) / Overcrowding rate (households with more than one person per room)	OECD, Eurostat	+	–	+	+
9. Доля домохозяйств, находящихся в тяжелых жилищных условиях (домохозяйства, проживающие в крайне стесненных условиях в неблагоустроенном жилье) / Housing deprivation rate (households living in extremely cramped conditions in poor-quality housing)	OECD, Eurostat	+	–	+	+

⁸ Составлено авторами на основе анализа баз данных международных организаций, информации национальных статистических служб, баз данных исследовательских организаций (HOFINET) и библиографического исследования.

⁹ Евростат дает оценку показателя только в рамках обследований домохозяйств — последние доступные данные на 2012 г.

¹⁰ Неполный охват стран, данные представлены чаще всего за предыдущие периоды.

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

Жилищный индикатор Housing indicator	Базы данных Data bases	Концепция устойчивого развития The concept of sustainable development	Концепция воспроизводства / The concept of housing reproduction	Концепция анализа ex post и ex ante / The concept of ex post ex ante analysis	Концепция жизненного цикла The concept of the life cycle of residential units
Показатели качества и количества жилища Indicators of the quality and quantity of housing					
10. Доля населения, имеющего туалет внутри жилища, в процентах от населения страны в целом / The share of the population having a toilet inside the dwelling, as a percentage of the country population	UN HABITAT, OECD	+	–	–	–
11. Число вакантных жилых единиц / Number of unoccupied dwellings	OECD, Eurostat	–	–	–	+
Показатели жилищного строительства Housing construction indicators					
1. Количество жилых единиц, строительство которых закончено в отчетном периоде Completed dwelling units (unit, percentage change)	OECD, Eurostat, HOFINET ¹⁰	–	+	+	+
2. Стоимость строительства новых жилых зданий / Construction cost of new residential buildings (index, percentage change)	OECD, Eurostat	–	+	+	+
3. Валовая добавленная стоимость жилищного строительства / Gross value added of the residential construction sector: Assets: Dwellings (index, percentage change, current prices)	OECD, Eurostat	–	+	+	+
4. Доля жилищного строительства в ВВП Residential construction, % of GDP	OECD, Eurostat	–	+	+	+
5. Динамика площади или количества жилищ, заявленная в разрешениях на строительство жилья / Residential building permits — Buildings started (dwelling unit, m ² of floor area)	Eurostat	–	+	+	+
6. Площадь жилья, строительство которого окончено в отчетном году / Floor area (space) in completed dwellings	OECD, Eurostat	–	+	+	+
7. Средний размер построенного жилища Average floor area per dwelling — new construction	OECD, Eurostat	+	+	+	–
Показатели эксплуатационной доступности жилища Indicators of operational accessibility of housing					
1. Величина (бремя) расходов на жилье Value of housing costs (in percent)	OECD, Eurostat, Housing Europe	+	–	+	+
2. Уровень превышения расходов на жилье над доходами домохозяйства / Housing cost overburden rate (in percent)	OECD, Eurostat, Housing Europe	+	–	+	+
3. Доля расходов на жилье в расходах домохозяйств на конечное потребление Housing expenditure as share of final consumption expenditure of households	OECD, Eurostat	+	–	+	+

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Жилищный индикатор Housing indicator	Базы данных Data bases	Концепция устойчивого развития The concept of sustainable development	Концепция воспроизводства / The concept of housing reproduction	Концепция анализа ex post и ex ante / The concept of ex post ex ante analysis	Концепция жизненного цикла The concept of the life cycle of residential units
Показатели эксплуатационной доступности жилища Indicators of operational accessibility of housing					
4. Показатель «жилищной бедности» / Shelter poverty	OECD, Eurostat, M. Stone [22], M. Stone, T. Burke, L. Ralston [23]	+	–	+	+
5. Бедность домохозяйства, вызванная расходами на жилье / Housing-induced poverty	OECD, Eurostat, N. Kutty [24]	+	–	+	+
Показатели рыночной доступности жилья Indicators of housing market affordability					
1. Соотношение цены жилья на рынке жилья и дохода домохозяйства / House-price-to- income ratio	OECD, HOFINET ¹⁰	+	–	+	+
2. Соотношение цены аренды жилья и дохода домохозяйства / Rent price-to-income ratio	OECD, Eurostat	+	–	+	+
«Субъективные» показатели адекватности и доступности жилья “Subjective” indicators of housing adequacy and affordability					
1. Уровень удовлетворенности населения жильем (доля населения, удовлетворенного наличием хорошего, доступного жилья в своем городе или районе, где они живут) Satisfaction with the availability of good affordable housing (share of people satisfied with the availability of good, affordable housing in their city or area where they reside)	OECD	+	–	+	–
2. Наличие у домохозяйства проблем с жильем (доля людей, ответивших, что за последние 12 мес были случаи, когда у них не было денег, чтобы обеспечить адекватное жилье) Housing as a key short-term concern (share of people responding that over the past 12 months they did not have enough money for an adequate shelter or housing for them and their family, by income level)	OECD	+	–	+	–
Показатели адекватности жилой среды Indicators of adequacy of the living environment					
1. Доля населения, использующего воду из централизованных источников / Proportion of population using basic drinking water services, by location, %	UN HABITAT	+	–	–	–
2. Среднегодовой уровень мелкодисперсных твердых частиц, мкг/м³ / Annual mean level of fine particulate matter (population-weighted), by location (micrograms per cubic meter), mgr/m³	UN HABITAT, OECD, World Bank	+	–	–	–
3. Зеленые насаждения в городской местности на 1 чел. / Green area in functional urban areas per person (square meters per person)	OECD ¹⁰	+	–	–	–

ния развития жилищной сферы применяются оценка на основе систем отдельных показателей [18], метод рангов и индексные методы, позволяющие про-ранжировать объекты оценки по уровню сопоставляемых характеристик, математико-статистические методы [13–15], а также методы количественно-качественных оценок, использующие в анализе сочетание объективных и субъективных инструментов оценки. Так, подход к оценке адекватности жилища, разработанный исследователями Всемирного банка, предусматривает определение индекса адекватности жилища (базируется на индексном методе), рассчитываемого на основе показателей, полученных в результате опросов населения [17]. Метод рангов и индексные методы являются наиболее универсальными и дают возможность получить легко интерпретируемые результаты.

В настоящее время широко используется методология компаративных исследований, основанная на методе экспертных оценок — интервьюирование и различные социологические опросы. Например, такие исследования проводятся с 2001 г. в рамках Программы европейских социальных исследований [25]. На интервьюировании основаны и переписи населения, обследования домохозяйств, проводимые национальными статистическими агентствами, в том числе Росстатом, результаты которых становятся информационной базой компаративных исследований. На методологии социологических опросов построена и оценка индекса жилищных прав (HRI) [26].

Апробация авторами подходов к выполнению компаративного анализа показала, что среди методов компаративных сопоставлений жилищной сферы наиболее универсальным является индексный, позволяющий получить как интегрированную, так и дезагрегированную по отдельным подсистемам оценку жилищной сферы. Для выполнения компаративных сопоставлений автора-

ми предложен на основе индексного метода интегральный жилищный индекс, позволяющий про-ранжировать территории в рамках различных концепций исследования жилищной сферы. Далее приведены результаты компаративных сопоставлений стран мира согласно концепции устойчивого развития.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании выполнены компаративные сопоставления жилищной сферы в рамках концепции устойчивого развития для 41 страны мира, при этом перечень стран сформирован таким образом, чтобы с одной стороны охватить страны с различным уровнем экономического развития, а с другой — обеспечить возможность наиболее полного сопоставления с жилищной сферой России с целью выявления проблем в ее развитии и определении направлений совершенствования жилищной политики.

Для выполнения компаративных межстрановых сопоставлений авторами сформирована система жилищных индикаторов, которая включала в себя индикаторы адекватности жилища, индикаторы адекватности жилой среды и индикаторы доступности жилища (табл. 2). Каждый жилищный индикатор характеризует важную составляющую адекватности или доступности жилища — количество и качество жилища, качество жилой среды, эксплуатационную и рыночную доступность жилья, а также доступность жилищных услуг. Значения жилищных индикаторов, отсутствующие в базах данных международных организаций или в базах национальных статистических служб, были рассчитаны авторами статьи (табл. 2). Также при отсутствии значений показателей или при трудностях их определения для некоторых стран использовались данные, содержащиеся в научных публикациях. Значения жилищных индикаторов определялись на последнюю доступную дату, наиболее часто — на 2019, 2020 и 2021 гг.

Табл. 2. Жилищные индикаторы, учитываемые при расчете агрегированных индикаторов жилищной сферы

Table 2. Housing indicators taken into account when calculating aggregated indicators of the housing sector

Жилищный индикатор Housing indicator	Базы данных и способ определения жилищного индикатора Databases and the method of determining the housing indicator
<i>1. Индикаторы адекватности жилища / Indicators of housing adequacy</i>	
1.1. Количество комнат на человека Rooms per person	Eurostat ¹¹ , OECD ¹² , Rosstat ¹³
1.2. Средняя обеспеченность жильем Average floor area (space) occupied by 1 person in a household	Данные национальных статистических служб Австрии, Бельгии, Болгарии, Польши, Франции, Германии, Дании, Чехии, Южной Кореи, Швеции, Швейцарии, Латвии, России; для других стран рассчитано авторами на основе данных о среднем размере жилища, числе жилищ и численности населения / Data from the national statistical services of Austria, Belgium, Bulgaria, Poland, France, Germany, Denmark, Czech Republic, South Korea, Sweden, Switzerland, Latvia, Russia; for other countries it was calculated by authors on the basis of data on the average size of a dwelling, the number of dwellings and the population

¹¹ Average number of rooms per person by tenure status and dwelling type from 2003 onwards — EU-SILC survey // Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ILC_LVHO03__custom_2927843/default/table?lang=en

¹² OECD Affordable Housing Database // OECD. URL: <https://www.oecd.org/els/family/HC2.1-Living-space.xlsx>

¹³ Комплексное наблюдение условий жизни // Федеральная служба государственной статистики. URL: https://gks.ru/free_doc/new_site/GKS_KOUZH-2020/index.html

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Жилищный индикатор Housing indicator	Базы данных и способ определения жилищного индикатора Databases and the method of determining the housing indicator
<i>1. Индикаторы адекватности жилища / Indicators of housing adequacy</i>	
1.3. Доля домохозяйств, находящихся в стесненных жилищных условиях (в процентах) Overcrowding rate (in percent)	Eurostat ¹⁴ , OECD ^{12, 15} , для России рассчитано авторами по микроданным комплексного наблюдения условий жизни населения ¹³ , также по данным исследования ¹⁶ / For Russia: calculation made by the authors is based on microdata of Complex observation of living conditions of the population ¹³ , also research data ¹⁶
1.4. Доля домохозяйств, находящихся в тяжелых жилищных условиях Housing deprived population	Eurostat ¹⁷ , OECD ¹⁸ , для России рассчитано авторами по микроданным комплексного наблюдения условий жизни населения ¹³ , данным статистических служб, также данным исследований ¹⁹ / For Russia: calculation made by the authors is based on microdata of Comprehensive monitoring of the living conditions of the population ¹³ , data from statistical services, also research data ¹⁹
1.5. Жилища, оборудованные базовыми видами благоустройства / Dwellings with basic amenities	UN ²⁰ , OECD ²¹
1.6. Городское население страны, живущее в трущобах / Proportion of urban population living in slums (percent)	UN ²⁰
<i>2. Индикаторы адекватности жилой среды / Indicators of the adequacy of the living environment</i>	
2.1. Доля населения, использующего воду из централизованных источников / Proportion of population using basic drinking water services, by location (percent)	UN ²⁰
2.2. Среднегодовой уровень мелкодисперсных твердых частиц, мкг/м ³ Annual mean level of fine particulate matter (population-weighted), by location (micrograms per cubic meter), mgr/m ³	World Bank ²²
2.3. Зеленые насаждения в городской местности на 1 чел. Green area in functional urban areas per people (square meters per person)	Рассчитано авторами на основе данных о площади зеленых насаждений в городской местности ²³ и численности городского населения ²⁴ , также оценке на основе данных исследований ²⁵ Calculation made by the authors is based on the data on the area of green spaces in urban areas ²³ , urban population numbers ²⁴ , and research data ²⁵

¹⁴ Overcrowding rate by age, sex and poverty status — total population — EU-SILC survey // Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ilc_lvho05a/default/table?lang=en

¹⁵ Housing Sector Country Snapshot: COLOMBIA // OECD. URL: <https://housingpolicytoolkit.oecd.org/www/CountryFiches/housing-policy-Colombia.pdf>

¹⁶ Nkosi V., Haman T., Naicker N., Mathee A. Overcrowding and health in two impoverished suburbs of Johannesburg, South Africa. BMC Public Health. 2019.

¹⁷ Housing deprivation rate by number of item — EU-SILC survey // Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tessi291/default/table?lang=en>

¹⁸ OECD Affordable Housing Database // OECD. URL: <https://www.oecd.org/els/family/HC2.3-Severe-housing-deprivation.xlsx>

¹⁹ Owen G., Chen Yu., Pryce G., Birabi T., Song H., Wang B. Deprivation Indices in China: Establishing Principles for Application and Interpretation // Urban Inequality and Segregation in Europe and China: Towards a New Dialogue. Springer. Pp. 305–327.

²⁰ Statistics SDG Indicators Database. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/dataportal/database>

²¹ OECD Better Life Index // OECD. URL: <https://www.oecdbetterlifeindex.org/ru/>

²² PM2.5 air pollution, mean annual exposure // World bank. URL: <https://api.worldbank.org/v2/en/indicator/EN.ATM.PM25.MC.M3?downloadformat=excel>

²³ Land cover in Functional Urban Areas // OECD Statistics. URL: <https://stats.oecd.org/#>; Urban tree cover // European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/urban-tree-cover>; Сведения о благоустройстве городских населенных пунктов / Росстат. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Sved_blag.xls

²⁴ Population, total (Urban population) // World Bank Open Data. URL: <https://api.worldbank.org/v2/en/indicator/SP.POP.TOTL?downloadformat=excel>

²⁵ Newete S.W., Abutaleb K., Byrne M.J. Mapping the distribution and tree canopy cover of Jacaranda mimosifolia and Platanus acerifolia in Johannesburg’s urban forest. 2022. Scientific Reports 12 (5998); Da He, Qian Shi, Xiaoping Liu, Yanfei Zhong, Liangpei Zhang. Generating 2m fine-scale urban tree cover product over 34 metropolises in China based on deep context-aware sub-pixel mapping network // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. P. 106.

Жилищный индикатор Housing indicator	Базы данных и способ определения жилищного индикатора Databases and the method of determining the housing indicator
3. Индикаторы доступности жилища / Indicators of housing affordability	
3.1. Величина (бремя) расходов на жилье Housing costs (in percent)	OECD ²⁶ , Eurostat ²⁷ , также данные исследования ²⁸ , для России рассчитано авторами по данным Росстата для среднестатистического домохозяйства / Also research data ²⁸ , for Russia: calculation by authors according to Rosstat data for an average household
3.2. Доля расходов на жилье в расходах домохозяйств на конечное потребление Housing expenditure as a share of final consumption expenditures of households	OECD ^{21, 29} , Eurostat ³⁰
3.3. Соотношение цены жилья на рынке жилья и дохода домохозяйства House price-to-income ratio	OECD ³¹ , данные аналитических организаций ³² , для России рассчитано авторами по данным Росстата / Data from research companies ³² , for Russia: calculation made by the authors using the Rosstat data
3.4. Соотношение цены аренды жилья и дохода домохозяйства Rent price-to-income ratio	Рассчитано авторами на основе данных о средней арендной плате в месяц аналитических агентств ³³ и данных о доходах на человека ³⁴ / Calculation made by authors is based on data about the average monthly rent provided of research agencies ³³ and data on income per person ³⁴

В рамках апробации предложенной методологии на основе концепции устойчивого развития были определены три агрегированных индекса: индекс адекватности жилища, индекс адекватности жилой среды, индекс доступности жилища. Индексы определялись на основе нормированных значений жилищных индикаторов, которые рассчитывались с помощью метода линейного масштабирования с учетом положительного или отрицательного влияния жилищных индикаторов на оцениваемую характеристику адекватности или доступности жилища (положительное влияние жилищного индикатора на оцениваемую характеристику, например на адекватность жилища, предполагает рост значения агрегированного индекса при увеличении значения жилищного индикатора, отрицательное влияние — соответственно, наоборот).

Способ нормирования показателей определил и границы значений агрегированных характеристик — минимально возможное значение расчетных индексов равно нулю (соответствует наихудшей ситуации), а максимально возможное — единице (соответствует наилучшей ситуации). Затем на основе усреднения агрегированных индексов адекватности жилища, адекватности жилой среды и доступности жилища для каждой страны рассчитывался интегральный жилищный индекс I^H .

Расчет жилищных характеристик в странах мира показал существенную страновую дифференциацию уровня развития жилищной сферы (рис. 2). Интегральный жилищный индекс не достигает 0,30 в таких странах, как Южная Африка и Китай, имеет значение менее 0,5 в России и Бразилии, при этом его величина превышает 0,70 в Австралии, Канаде, США,

²⁶ OECD Affordable Housing Database // OECD. URL: <https://www.oecd.org/els/family/HC1.2-Housing-costs-over-income.xlsx>

²⁷ Median of the housing cost burden distribution by age, sex and poverty status — EU-SILC survey // Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ilc_lvho08a/default/table?lang=en

²⁸ Acolin A., Green R.K. Measuring housing affordability in São Paulo metropolitan region: Incorporating location. Cities. 2017. No. 62. Pp. 41–49.

²⁹ OECD Affordable Housing Database // OECD. URL: <https://www.oecd.org/els/family/HC1.1-Housing-related-expenditure-of-households.xlsx/>

³⁰ Final consumption expenditure of households by consumption purpose (COICOP 3 digit) // Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NAMA_10_CO3_P3_custom_2971734/default/table?lang=en

³¹ Analytical house prices indicators // OECD Statistics. URL: <https://stats.oecd.org/#>; Housing Sector Country Snapshot: ICELAND // OECD. URL: <https://housingpolicytoolkit.oecd.org/www/CountryFiches/housing-policy-Iceland.pdf>

³² House Prices / GDP per Capita in Cyprus compared to Europe / Global Property Guide. URL: <https://www.globalpropertyguide.com/Europe/Cyprus/price-gdp-per-cap>

³³ Prices by Country of Apartment (1 bedroom) in City Centre (Rent Per Month) / Numbeo. URL: https://www.numbeo.com/cost-of-living/prices_by_country.jsp?displayCurrency=USD&itemId=26

³⁴ Median Income by Country 2022 / 2022 World Population Review. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/median-income-by-country>



Рис. 2. Распределение стран мира по значению интегрального жилищного индекса

Fig. 2. Breakdown of the countries of the world by the value of the integral housing index

Новой Зеландии, Норвегии, Финляндии, Швеции, Эстонии, на Кипре и Южной Корее. На карте видно, что значительная часть мирового населения испытывает потребность в улучшении жилищных условий, нуждается в повышении адекватности и доступности жилища, повышении качества жилой среды.

Группировка стран мира по величине интегрального жилищного индекса показывает низкий уровень адекватности жилища, жилой среды и доступности жилища в развивающихся странах по сравнению со странами Европы и Америки, Японией и Южной Кореей (табл. 3). Разница наиболее ощутима в обеспеченности населения адекватным жилищем и адекватной жилой средой, если в Южной Африке и Китае агрегированный индекс

адекватности жилища имеет значения 0,014 и 0,306 соответственно, а индекс адекватности жилой среды — 0,197 и 0,001, то в странах с наиболее высоким интегральным жилищным индексом среднее значение индекса адекватности жилища составляет 0,701, а индекса адекватности жилой среды — 0,680. Значительные различия в уровне адекватности жилища и жилой среды обусловлены высокой степенью дифференции значений основных индикаторов адекватности в странах мира. Так, если в Южной Африке средняя обеспеченность жильем составляет 10,9 м² площади жилья на человека, в стесненных жилищных условиях находятся 45 % домохозяйств, в Бразилии — 20,2 м² и 39 % соответственно, в Мексике — 22,0 и 33,2 %, то в Австралии на од-

Табл. 3. Группировка стран мира по величине интегрального жилищного индекса и соответствующим средним значениям агрегированных индексов

Table 3. Grouping of the countries of the world by the value of the integral housing index and corresponding average values of aggregated indices

Группа по величине интегрального жилищного индекса I^H The group by the value of the integral housing index I^H	Страны мира в группе Countries of the world in the group	Среднее значение индекса адекватности жилища в группе The average value of the housing adequacy index in the group	Среднее значение индекса адекватности жилой среды в группе The average value of the residential environment adequacy index in the group	Среднее значение индекса доступности жилища в группе The average value of the housing affordability index in the group
Менее 0,3 Below 0.3	Китай, Южно-Африканская Республика / China, South Africa	0,160	0,099	0,399
От 0,3 до 0,6 From 0.3 to 0.6	Бразилия, Греция, Колумбия, Мексика, Россия, Румыния, Словакия / Brazil, Colombia, Greece, Mexico, Romania, Russia, Slovakia	0,398	0,561	0,586

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Группа по величине интегрального жилищного индекса I^H The group by the value of the integral housing index I^H	Страны мира в группе Countries of the world in the group	Среднее значение индекса адекватности жилища в группе The average value of the housing adequacy index in the group	Среднее значение индекса адекватности жилой среды в группе The average value of the residential environment adequacy index in the group	Среднее значение индекса доступности жилища в группе The average value of the housing affordability index in the group
Более 0,6 Over 0.6	Австралия, Австрия, Бельгия, Болгария, Канада, Чили, Хорватия, Кипр, Чехия, Дания, Эстония, Финляндия, Франция, Германия, Венгрия, Исландия, Ирландия, Италия, Япония, Латвия, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, Польша, Португалия, Словения, Южная Корея, Испания, Швеция, Швейцария, Великобритания, Соединенные Штаты / Australia, Austria, Belgium, Bulgaria, Canada, Chile, Croatia, Cyprus, Czechia, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Japan, Latvia, Netherlands, New Zealand, Norway, Poland, Portugal, Slovenia, South Korea, Spain, Sweden, Switzerland, United Kingdom, United States	0,701	0,680	0,639

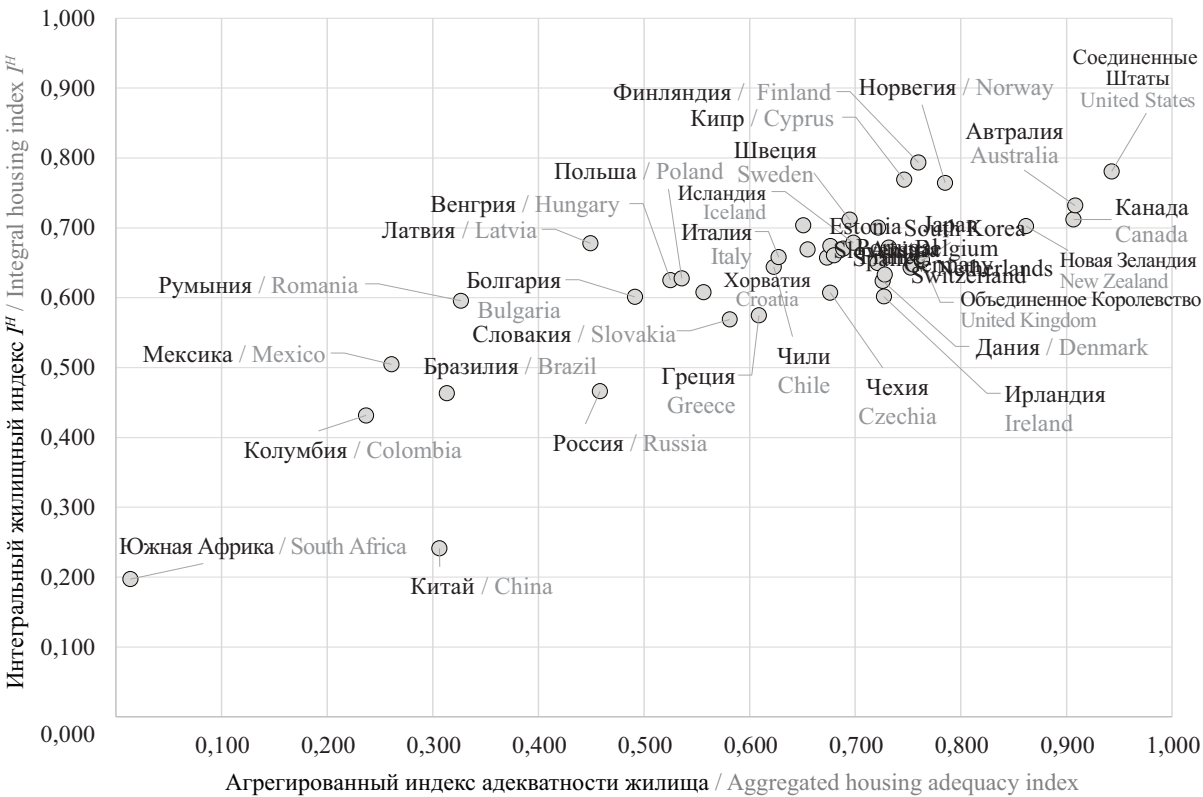


Рис. 3. Распределение стран мира по значениям агрегированного индекса адекватности жилища и интегрального жилищного индекса

Fig. 3. Breakdown of countries of the world according to values of the aggregated housing adequacy index and the integral housing index

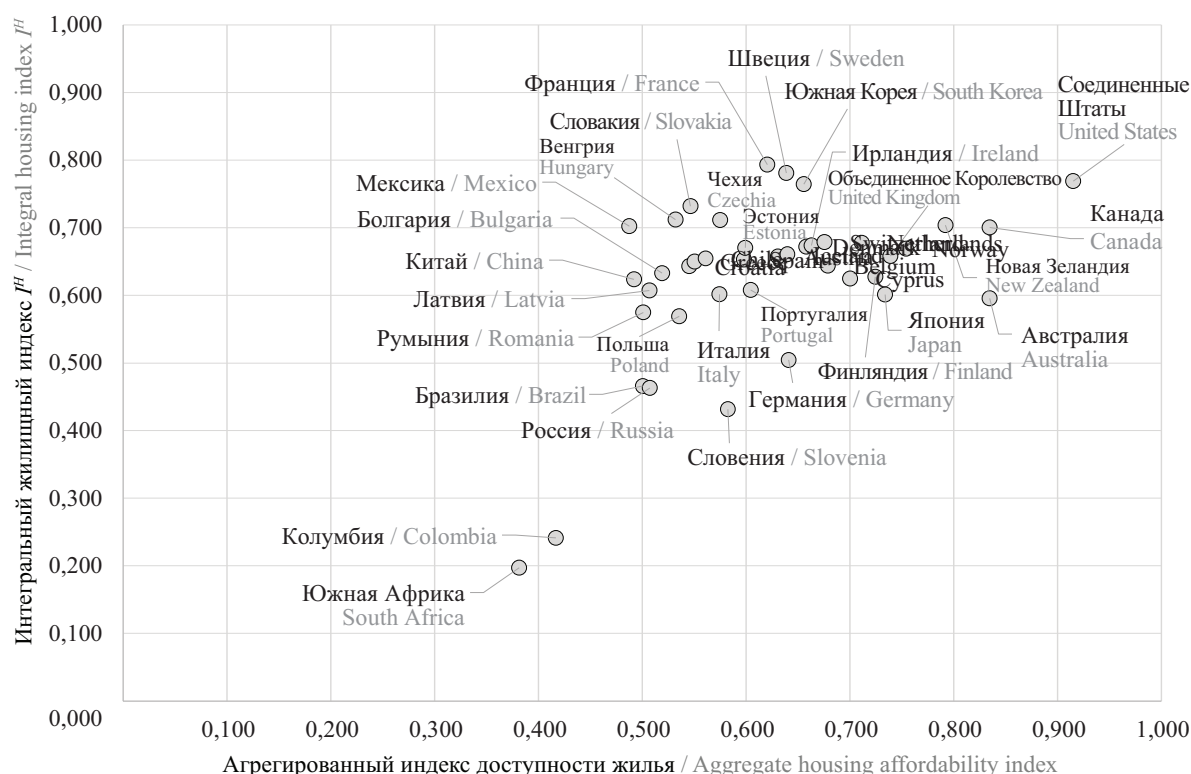


Рис. 4. Распределение стран мира по значениям агрегированного индекса доступности жилья и интегрального жилищного индекса

Fig. 4. Breakdown of the countries of the world according to values of the aggregated housing affordability index and the integral housing index

ного человека приходится 88 м² жилой площади и лишь 1,5 % домохозяйств находятся в стесненных жилищных условиях, в Канаде — 77,0 м² и 0,7 %, в США — 68,0 м² и 4,2 %. Из рис. 3 также видно, что вариативность агрегированного индекса адекватности жилища обуславливает разброс значений интегрального жилищного индекса. Коэффициент вариации показателя адекватности по анализируемой выборке стран равен 31,7 % — минимальное значение агрегированного индекса адекватности приходится на Южную Африку (0,014), максимальное — на США (0,943). Прямая зависимость между агрегированным индексом адекватности жилища и интегральным жилищным индексом показывает, что адекватность жилища в значительной степени определяет развитие жилищной сферы в целом.

Меньшие различия наблюдаются в уровне доступности жилья, если в Южной Африке и Китае агрегированный индекс доступности равен 0,381 и 0,417 соответственно, то в странах с наиболее высоким уровнем развития жилищной сферы его среднее значение составляет 0,639 (табл. 3). Сравнительно небольшая разница в агрегированном показателе доступности жилья обусловлена ростом цен на жилую недвижимость в большинстве стран мира и увеличением отношения цен на рынке жилья и цен аренды жилья к доходам населения. В целом по странам Евросоюза цены на жилье за 2020–2022 гг. выросли на 23,2 %, в США — на 39,9 %, в Ав-

стралии — на 23,8 %, в Бразилии — на 19,7 %, в Японии — на 14,9 %³⁵. Данные на рис. 4 также иллюстрируют меньший разброс значений агрегированного индекса доступности жилья (коэффициент вариации показателя составляет 18,6 %) — наименьшее значение показателя наблюдается в Южной Африке (0,381), наибольшее — на Кипре (0,915). Агрегированный индекс доступности жилища вносит меньший вклад в изменчивость интегрального жилищного индекса — соотношение между ценами на рынке жилья, на рынках жилищных и жилищно-эксплуатационных услуг и доходами населения в странах мира обуславливает меньший разброс значений индекса доступности жилья в большинстве стран Европы и Америки — от 0,449 до 0,943 (в группе стран со значением интегрального жилищного индекса более 0,6 — см. табл. 3).

Расчеты авторов, выполненные в рамках концепции устойчивого развития, показали отсутствие пространственной сбалансированности в обеспечении населения адекватным и доступным жилищем, что, в свою очередь, является существенным препятствием на пути устойчивого развития жилищной сферы как на уровне отдельных стран, так и на уровне глобальной экономики.

³⁵ Рассчитано по данным: National and Regional House Price Indices — Headline indicators / OECD Statistics. URL: <https://stats.oecd.org/#>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Компаративные исследования служат важнейшим инструментарием и информационной основой разработки механизмов государственного регулирования экономических отношений в различных сферах экономической деятельности и на разных уровнях управления.

Предложенные в статье методологические подходы к компаративным исследованиям жилищной сферы развивают теоретическую базу и методологический инструментарий пространственных исследований, а также формирования государственной жилищной политики. Представленные в данной работе концептуальные подходы к компаративным сопоставлениям могут быть положены в основу дальнейших исследований жилищной сферы для:

- оценки уровня развития жилищной сферы в рамках любой рассмотренной концепции: в целях

анализа уровня адекватности и доступности жилья, исследования сбалансированности стадий его воспроизводства; выявления проблем использования жилья на разных стадиях его ЖЦ в различных территориальных системах;

- выявления территориальной неоднородности развития жилищной сферы в зависимости от целей и задач исследования, в том числе с целью выработки мер пространственного выравнивания при разработке государственной жилищной политики.

Приведенные в статье расчеты авторов, выполненные в рамках концепции устойчивого развития, свидетельствуют о пространственных диспропорциях в распределении стран мира по уровню адекватности и доступности жилья, что выступает фактором, сдерживающим устойчивое развитие не только жилищной сферы, но и страновых экономик в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тоганова Н.В. Методологические проблемы современной компаративистики // Мировая экономика и международные отношения. 2014. № 10. С. 18–27. EDN SNVGVF.
2. Ананьин О.И. Экономическая компаративистика: методология, опыт, перспективы // Экономика цивилизаций в глобальном измерении. 2011. С. 109–141.
3. Нуреев Р. Старая и новая экономическая компаративистика. Предмет и метод компаративистики // Terra Economicus. 2010. Т. 8. № 3. С. 143–154. EDN NBJQTL.
4. Андреева Е.Л., Ратнер А.В., Захарова В.В. Международный компаративный анализ поддержки экономик в условиях пандемии // Теоретическая экономика. 2020. № 9 (69). С. 70–78. EDN TPJUK.
5. Минченко М.М., Ноздрина Н.Н. Динамика доступности жилья для населения России в 2008–2014 гг. // Проблемы прогнозирования. 2017. № 2 (161). С. 89–105. EDN YZKFMN.
6. Kosareva N., Polidi T. Housing affordability in Russia // Housing Policy Debate. 2021. Vol. 31. Issue 2. Pp. 214–238. DOI: 10.1080/10511482.2020.1800778
7. Муфтахова А.Н., Козырева Л.Д. Жилищная стратификация в странах Евросоюза // Экономическая социология. 2018. Т. 19. № 1. С. 116–142. DOI: 10.17323/1726-3247-2018-1-117-144. EDN YPAJDL.
8. Косарева Н.Б., Полиди Т.Д. Доступность жилья в России и за рубежом // Вопросы экономики. 2019. № 7. С. 29–51. DOI: 10.32609/0042-8736-2019-7-29-51. EDN ERYJQ.
9. Овсянникова Т.Ю., Рабцевич О.В., Югова И.В. Компаративные межстрановые исследования жилищной сферы // Жилищные стратегии. 2021. Т. 8. № 4. С. 317–342. DOI: 10.18334/zhs.8.4.113978. EDN VGKWX.
10. Mirgorodskaya E., Wiegand D., Novoselova I. Comparative inter-country analysis of assessment of the effectiveness of state housing policy: statistical instruments // Real Estate: Economics, Management. 2021. Issue 3. Pp. 35–40. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-3-35-40
11. Савоскина Е.В., Солопова Н.А., Акри Е.П., Домнина С.В. Анализ инновационных механизмов решения жилищных проблем в Российской Федерации // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 8. С. 1096–1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1096-1112. EDN VVKYWX.
12. Oxley M. Meaning, science, context and confusion in comparative housing research // Journal of Housing and the Built Environment. 2001. Vol. 16. Issue 1. Pp. 89–106. DOI: 10.1023/A:1011599006494
13. Ramalhet I., Farias H., da Silva Pinto R. Overcrowding and adequate housing: the potential of adaptability // International Journal of Architectural and Environmental Engineering. 2018. Vol. 12. Issue 12. Pp. 1203–2013. DOI: 10.5281/zenodo.2363318
14. Fisher L.M., Pollakowski H.O., Zabel J.E. Amenity-based housing affordability indexes // Real Estate Economics. 2009. Vol. 37. Issue 4. Pp. 705–746. DOI: 10.1111/j.1540-6229.2009.00261.x
15. Emrath P., Taylor H. Housing value, costs, and measures of physical adequacy // Cityscape: A Journal of Policy Development and Research. 2012. Vol. 14. Issue 1. Pp. 99–125. DOI: 10.2307/41553083
16. Mulliner E., Smallbone K., Maliene V. An Assessment of sustainable housing affordability using a multiple criteria decision making method // Omega. 2013. Vol. 41. Issue 2. Pp. 270–279. DOI: 10.1016/j.omega.2012.05.002
17. Behr D.M., Chen L., Goel A., Haider Kh.T., Singh S., Zaman A. Introducing the adequate housing index: a new approach to estimate the adequate housing

deficit within and across emerging economies. World Bank, Washington, 2021.

18. Appolloni L., D'Alessandro D. Housing spaces in nine european countries: a comparison of dimensional requirements // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Issue 8. P. 4278. DOI: 10.3390/ijerph18084278

19. Овсянникова Т.Ю. Инвестиции в жилище. Томск, 2005. 379 с. EDN TGVYNB.

20. Pullen S., Arman M., Zillante G., Zuo J., Chil-eshe N., Wilson L. Developing an assessment framework for affordable and sustainable housing // *Construction Economics and Building*. 2010. Vol. 10. Issue 1–2. Pp. 48–64. DOI: 10.5130/AJCEB.v10i1-2.1587

21. Adamec J., Janoušková S., Hák T. How to measure sustainable housing: a proposal for an indicator-based assessment tool // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 3. P. 1152. DOI: 10.3390/su13031152

22. Stone M. A Housing affordability standard for the UK // *Housing Studies*. 2006. Vol. 21. Issue 4. Pp. 453–476. DOI: 10.1080/02673030600708886

23. Stone M., Burke T., Ralston L. The residual income approach to housing affordability: the theory and the practice // *AHURI Positioning Paper No. 139*. 2011.

24. Kutty N. A new measure of housing affordability: Estimates and analytical results // *Housing Policy Debate*. 2005. Vol. 16. Issue 1. Pp. 113–142. DOI: 10.1080/10511482.2005.9521536

25. Андреевкова А.В. Сравнительные меж-страновые исследования в социальных науках: теория, методология, практика. М. : Новый хронограф, 2014. 516 с. EDN TBEOLM.

26. Acioly Jr.C., Madhuraraj A. The housing rights index: a policy formulation support tool // *United Nations Human Settlements Programme*. 2018.

Поступила в редакцию 24 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 26 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Татьяна Юрьевна Овсянникова** — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой экспертизы и управления недвижимостью; **Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)**; 634003, г. Томск, пл. Соляная, д. 2; РИНЦ ID: 504255, Scopus: 6603240723, ResearcherID: E-6457-2016, ORCID: 0000-0002-0771-7114; tatovs@mail.ru;

Ольга Валерьевна Рабцевич — кандидат экономических наук, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью; **Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)**; 634003, г. Томск, пл. Соляная, д. 2; РИНЦ ID: 232902, Scopus: 57193124942, ResearcherID: I-1890-2018, ORCID: 0000-0002-0930-6976; antrea85@yandex.ru.

Вклад авторов: авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Toganova N.V. Some methodological problems of contemporary economic comparative studies. *MEMO Journal*. 2014; 10:18-27. EDN SNVGVF. (rus.).

2. Anan'in O.I. Economic comparative studies: methodology, experience, prospects. *Economics of Civilizations in the Global Dimension*. 2011; 109-141. (rus.).

3. Nureev R.M. The old economic comparativistics and the new one. Subject and method of comparativistics. *Terra Economicus*. 2010; 8(3):143-154. EDN NBJQTL. (rus.).

4. Andreeva E.L., Ratner A.V., Zakharova V.V. International comparative analysis of support for economies in terms of pandemic. *Theoretical Economy*. 2020; 9(69):70-78. EDN TPIJUK. (rus.).

5. Minchenko M.M., Nozdrina N.N. The dynamics of housing affordability for the population of Russia in 2008–2014. *Studies on Russian Economic Development*. 2017; 2(161):89-105. EDN YZKFMN. (rus.).

6. Kosareva N., Polidi T. Housing affordability in Russia. *Housing Policy Debate*. 2021; 31(2):214-238. DOI: 10.1080/10511482.2020.1800778

7. Muftakhova A., Kozyreva L. Housing stratification in the European Union. *Journal of Economic Sociology*. 2018; 19(1):116-142. DOI: 10.17323/1726-3247-2018-1-117-144. EDN YPAJDL. (rus.).

8. Kosareva N.B., Polidi T.D. Housing affordability in Russia and foreign countries. *Voprosy Ekonomiki*. 2019; 7:29-51. DOI: 10.32609/0042-8736-2019-7-29-51. EDN ERYSJQ. (rus.).

9. Ovsyannikova T.Yu., Rabtsevich O.V., Yugova I.V. Comparative cross-country studies of the housing sector. *Russian Journal of Housing Research*. 2021; 8(4):317-342. DOI: 10.18334/zhs.8.4.113978. EDN VGKWXR. (rus.).

10. Mirgorodskaya E., Wiegand D., Novoselova I. Comparative inter-country analysis of assessment of the effectiveness of state housing policy: statistical instruments. *Real Estate: Economics, Management*. 2021; 3:35-40. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-3-35-40

11. Savoskina E.V., Solopova N.A., Akri E.P., Domnina S.V. Analysis of innovative mechanisms for solving housing problems in the Russian Federation. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Ar-*

chitecture]. 2022; 17(8):1096-1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1096-1112. EDN VVKYWX. (rus.).

12. Oxley M. Meaning, science, context and confusion in comparative housing research. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2001; 16(1):89-106. DOI: 10.1023/A:1011599006494

13. Ramalhete I., Farias H., da Silva Pinto R. Overcrowding and adequate housing: the potential of adaptability. *International Journal of Architectural and Environmental Engineering*. 2018; 12(12):1203-2013. DOI: 10.5281/zenodo.2363318

14. Fisher L.M., Pollakowski H.O., Zabel J.E. Amenity-based housing affordability indexes. *Real Estate Economics*. 2009; 37(4):705-746. DOI: 10.1111/j.1540-6229.2009.00261.x

15. Emrath P., Taylor H. Housing value, costs, and measures of physical adequacy. *Cityscape: A Journal of Policy Development and Research*. 2012; 14(1):99-125. DOI: 10.2307/41553083

16. Mulliner E., Smallbone K., Maliene V. An assessment of sustainable housing affordability using a multiple criteria decision making method. *Omega*. 2013; 41(2):270-279. DOI: 10.1016/j.omega.2012.05.002

17. Behr D.M., Chen L., Goel A., Haider Kh.T., Singh S., Zaman A. *Introducing the Adequate Housing Index: A New Approach to Estimate the Adequate Housing Deficit within and across Emerging Economies*. World Bank, Washington, 2021.

18. Appolloni L., D'Alessandro D. Housing spaces in nine European countries: a comparison of dimen-

sional requirements. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(8):4278. DOI: 10.3390/ijerph18084278

19. Ovsianikova T. *Housing Investment*. Tomsk, 2005; 379. EDN TGVYNB. (rus.).

20. Pullen S., Arman M., Zillante G., Zuo J., Chileshe N., Wilson L. Developing an assessment framework for affordable and sustainable housing. *Construction Economics and Building*. 2010; 10(1-2):48-64. DOI: 10.5130/AJCEB.v10i1-2.1587

21. Adamec J., Janoušková S., Hák T. How to measure sustainable housing: a proposal for an indicator-based assessment tool. *Sustainability*. 2021; 13(3):1152. DOI: 10.3390/su13031152

22. Stone M. A housing affordability standard for the UK. *Housing Studies*. 2006; 21(4):453-476. DOI: 10.1080/02673030600708886

23. Stone M., Burke T., Ralston L. The residual income approach to housing affordability: the theory and the practice. *AHURI Positioning Paper No. 139*. 2011.

24. Kutty N. A new measure of housing affordability: Estimates and analytical results. *Housing Policy Debate*. 2005; 16(1):113-142. DOI: 10.1080/10511482.2005.9521536

25. Andreenkova A. *Comparative cross-country research in social sciences: theory, methodology, practice*. Moscow, New Chronograph, 2014; 516. EDN TBEOLM. (rus.).

26. Acioly Jr.C., Madhura A. The housing rights index: a policy formulation support tool. *United Nations Human Settlements Programme*. 2018.

Received October 24, 2023.

Adopted in revised form on February 26, 2024.

Approved for publication on February 26, 2024.

BIONOTES: **Tatiana Yu. Ovsianikova** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Head of the Department of Expertise and Real Estate Management; **Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB)**; 2 Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russian Federation; ID RSCI: 504255, Scopus: 6603240723, ResearcherID: E-6457-2016, ORCID: 0000-0002-0771-7114; tatovs@mail.ru;

Olga V. Rabtsevich — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Expertise and Real Estate Management; **Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB)**; 2 Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russian Federation; ID RSCI: 232902, Scopus: 57193124942, ResearcherID: I-1890-2018, ORCID: 0000-0002-0930-6976; antrea85@yandex.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 33

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1217-1227

Рынок строительных организаций полного цикла: анализ современного состояния и ключевых тенденций

Юлия Александровна Лаамарти¹, Евгений Геннадьевич Дедов²,
Александр Александрович Николаев¹

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет);
г. Москва, Россия;

² Смоленский филиал Финансового университета
при Правительстве Российской Федерации (Смоленский филиал Финуниверситета); г. Смоленск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие рынка строительных организаций полного цикла в современных условиях требует внимательного изучения ключевых тенденций его функционирования и совершенствования. Устоявшиеся традиционные подходы к его анализу на основе географических и продуктовых границ по параметрам количества построенных зданий, учета их площади и объемов в силу постепенной цифровизации отрасли строительства будут малоэффективными, потому что не учитывают альтернативные критерии, характеризующие цифровые рынки строительства. В подобных условиях прогнозировать развитие рынка строительных организаций полного цикла некорректно. Эволюция методов анализа рынка строительных организаций полного цикла характеризуется смещением акцента на использование девелоперами цифровых экосистем для взаимодействия с участниками рынков. По этой причине важное значение будут приобретать большие данные о строительстве и режим доступа к ним. Цель исследования — анализ современного состояния и тенденций развития российского рынка строительных организаций полного цикла.

Материалы и методы. Среди основных методов исследования использовались теоретический анализ научной литературы, анализ статистических данных и сравнительный анализ, обобщение и систематизация исследуемых сведений.

Результаты. На основе вторичной обработки данных с помощью вычисления среднегодового темпа роста выявлены ключевые тенденции развития рынка строительных организаций полного цикла. Систематизированы главные детерминанты, определяющие современное состояние рынка строительных организаций полного цикла. На основе анализа мнений ученых, экспертов и анализа статистики систематизированы причины и факторы, характеризующие современное состояние рынка строительных организаций полного цикла.

Выводы. Делается вывод о том, что ряд административно-правовых факторов, несмотря на положительную динамику рынка строительных организаций полного цикла, сдерживает его развитие, формирует барьеры для его качественных изменений. В свою очередь со стороны регуляторов возникает проблема внедрения цифровых технологий в строительную отрасль, связанная с санкциями и импортозамещением программного обеспечения для строительных организаций полного цикла, которые отдают предпочтение иностранным аналогам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительная отрасль, цифровое строительство, сетевой эффект, строительная организация полного цикла, девелопмент, импортозамещение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лаамарти Ю.А., Дедов Е.Г., Николаев А.А. Рынок строительных организаций полного цикла: анализ современного состояния и ключевых тенденций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1217–1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1217-1227

Автор, ответственный за переписку: Евгений Геннадьевич Дедов, EvgeniyD15@yandex.ru.

The market of full-cycle construction companies: analysis of the current state and key trends

Yulia A. Laamarti¹, Evgeny G. Dedov², Alexander A. Nikolaev¹

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation;

² Smolensk branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation (Smolensk branch of the Financial University); Smolensk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the present-day environment, development of the market of full-cycle construction companies needs a thorough research on key trends governing its operation and improvement. Due to the gradual digitalization of the construction industry, traditional approaches to its analysis, based on geographical and product boundaries in terms of the number, the floor area and the volume of constructed buildings, will become ineffective because they disregard alternative criteria characterizing digital construction markets. Against this background, the projected development of the market of full-cycle

construction companies is misleading. The evolution of methods for analyzing the market of full-cycle construction companies is characterized by a shift towards the use of digital ecosystems by developers willing to interact with market players. Hence, big data and data access modes will become increasingly important in the construction industry. The purpose of the study is to analyze the current state and trends in the Russian market of full-cycle construction companies.

Materials and methods. Theoretical analysis of research works, statistical data analysis and comparative analysis, data generalization and systematization are among the main research methods.

Results. Key trends governing the development of the market of full-cycle construction companies were identified by means of secondary data processing and computing the average annual growth rate. The main factors determining the current state of the market of full-cycle construction companies were systematized. Opinions of scientists, experts, as well as statistics were analyzed to systematize the reasons and factors, characterizing the current state of this market.

Conclusions. Despite the positive dynamics, observed in the market of full-cycle construction companies, some administrative and legal factors restrain its development and act as barriers to its qualitative changes. In turn, regulatory authorities must meet the challenge of introducing digital technologies in the construction industry amid sanctions and import substitution of software for full-cycle construction companies preferring foreign alternatives.

KEYWORDS: construction industry, digital construction, network effect, full-cycle construction company, development, import substitution

FOR CITATION: Laamarti Yu.A., Dedov E.G., Nikolaev A.A. The market of full-cycle construction companies: analysis of the current state and key trends. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1217-1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1217-1227 (rus.).

Corresponding author: Evgeny G. Dedov, EvgeniyD15@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшую роль в российской экономике играет строительная отрасль. Это выражается прежде всего в ее способности воспроизводить основные фонды в других отраслях промышленности, в высоком мультипликативном эффекте и формировании межотраслевых связей, что способствует социальному развитию страны и модернизации производства. Отрасль дает более 6 % валовой добавленной стоимости в экономике и отличается большой капиталоемкостью. Спрос на строительную продукцию непрерывно растет, что подтверждается объемом выполненных работ: 2021 г. — 10,79 трлн руб.; 2022 г. — 12,86 трлн руб.; 2023 г. — 15,1 трлн руб. [1]. Именно с помощью строительства решается множество задач государственного и социального характера. Решение подобных задач во многом обеспечивается сегодня усилиями строительных организаций полного цикла (или девелоперов).

В то же время макроэкономические изменения делают строительный комплекс наиболее уязвимым по отношению к кризисным явлениям. Это обстоятельство оказывает влияние на условия хозяйствования наиболее крупных участников строительного рынка. Требуется поиск новых конкурентоспособных подходов к управлению строительными организациями.

Определение путей трансформации отрасли требует внимательного изучения современного состояния строительного рынка и понимания основных тенденций его развития. Без этого решение масштабных производственных и научно-технических задач и количественные и качественные трансформации будут проблематичными в настоящих условиях. Решение стратегических задач российского строительного комплекса происходит посредством инвестиционных строительных проектов, реализуемых на различных территориальных уровнях. Прогнозирование разви-

тия строительной сферы целесообразно в тесной связи со стратегиями развития территорий РФ и стратегиями развития отраслей промышленности, которые зависят от строительной отрасли.

В условиях снижения спроса на построенное жилье, ухудшения макроэкономических показателей девелоперы полного цикла оказались в наиболее устойчивом положении и являются основой антикризисной стратегии развития строительной индустрии. Поэтому использование соответствующих статистических данных имеет важное значение для анализа тенденций и проблем развития рынка строительных организаций полного цикла и требует научного осмысления.

Цель исследования — анализ современного состояния и тенденций развития российского рынка строительных организаций полного цикла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Среди основных методов исследования использовались теоретический анализ научной литературы, анализ статистических данных и сравнительный анализ, обобщение и систематизация исследуемых сведений.

Установлено, что в общей структуре российского строительного рынка преобладает жилищное строительство. Перспективы его развития зависят от численности населения [2]. Отмечается неравномерность пространственного развития строительного рынка. Его пространственные диспропорции определяют комплекс социальных и экономических проблем. Территориально рынок строительных организаций полного цикла отличается структурными диспропорциями. Строительные организации этого типа предпочитают работать в регионах ЦФО, УФО, ПФО.

Их бизнес-модель предполагает осуществление комплекса работ на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) проекта. Российский строительный ры-

нок отличает непрозрачная бизнес-среда, представители которой используют консервативные бизнес-модели. Исследователи отмечают, что российская инвестиционно-строительная сфера характеризуется высокой степенью картелизации и антиконкурентных соглашений, связанных с ограничением конкуренции, снижением стоимости по минимуму и другими нарушениями на крупных строительных рынках, из-за которых закупки признаются несостоявшимися. Подобные технологии используются для создания барьеров для закупок со стороны застройщиков из соседних регионов.

К числу критериев для измерения рынка строительных организаций полного цикла следует отнести загрузку производственных мощностей, географические и продуктовые границы рынка. Кроме того, рынок измеряется в натуральном и стоимостном выражении. Для мониторинга состояния конкурентной среды строительного рынка и продуктовых границ учитываются характер производимой продукции, уровень рыночных барьеров, доли и состав участников строительного рынка (их нестабильность), коэффициенты рыночной концентрации, учет календарного фактора, строительство и ввод в эксплуатацию, и степень равномерности ввода недвижимости в эксплуатацию, выбытие из эксплуатации части жилого фонда. Для развития конкуренции в строительной отрасли используется ряд административных мер (методов): стандартизация, регламентация, использование целевых показателей развития конкуренции (влияет на структуру рынка и входные барьеры).

Исследователи подчеркивают, что избыток производственных мощностей российских строительных компаний превышает 66 % (лишь в небольшом количестве регионов этот показатель составляет 70–80 %) [3]. Таким образом, производственная программа строительных организаций ниже нор-

мативных значений. Также регулятор должен использовать и альтернативные критерии, которые учитывают применение цифровых технологий в строительстве (сетевые эффекты либо режим доступа к Big Data).

В процессе проведения исследования применялся анализ статистических данных для оценки трендов развития строительных организаций полного цикла и результатов их деятельности на российском строительном рынке по ряду критериев. Результативность строительной отрасли оценивалась на основе показателей, информация по которым получена с сайта Росстата. С целью вторичной обработки данных использовался коэффициент среднегодового темпа роста.

Ключевая идея заключается в оценке динамики количества и площадей возведенных зданий, динамики строительного объема введенных зданий и темпов роста возведенных зданий. По свидетельству зарубежных исследователей, эмпирических исследований, посвященных вопросам изучения структуры строительного рынка, организационных показателей на отраслевом уровне недостаточно. Строительный рынок представлен фирмами разного размера и специализации. По мнению зарубежных исследователей, крупные фирмы, выполняющие проектные работы и строительные подряды, являются более диверсифицированными. Однако этот фактор не объясняет отличий в темпах роста между строительными организациями и проектными, но позволяет демонстрировать стабильные показатели бизнеса, т.е. быть конкурентоспособным [4]. Отсюда вытекает необходимость объединения усилий проектировщиков и подрядчиков.

При этом учитывались сведения Росстата по текущей ситуации на рынке строительства за период 2018–2022 гг. Динамика количества введенных зданий за исследуемый период представлена на рис. 1.

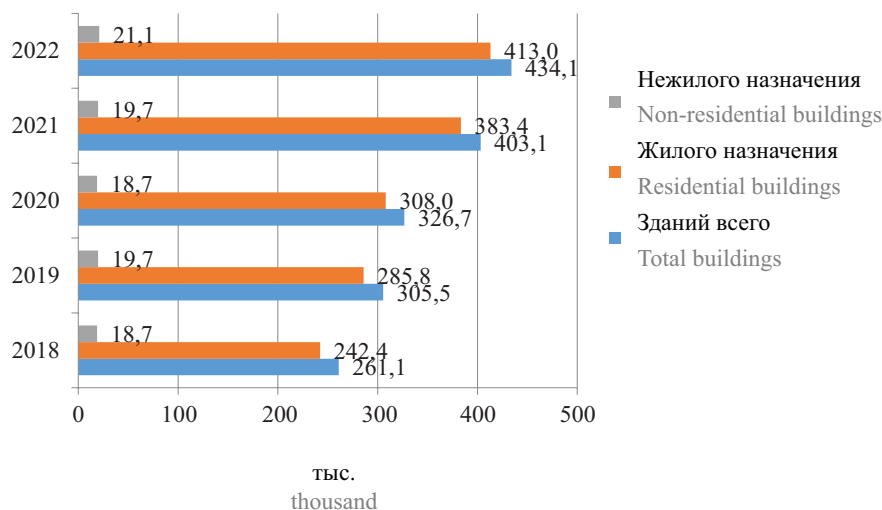


Рис. 1. Динамика количества введенных зданий в Российской Федерации за период 2018–2022 гг., тыс. зданий

Fig. 1. A change in the number of buildings commissioned in the Russian Federation in 2018–2022, thousand buildings

Данные на рис. 1 позволяют прийти к выводу о положительной ежегодной динамике по показателю возводимой жилой недвижимости: отмечается увеличение данного показателя за 2018–2022 гг. на 70,37 % (с 242,4 до 413 тыс. зданий). Введение зданий нежилого назначения по этому показателю за 2018–2022 гг. имеет разноплановую динамику: в целом за исследуемый период их количество выросло на 12,83 % (с 18,7 до 21,1 тыс. зданий). Вырос общий показатель введенных зданий на 66,25 % (с 261 тыс. до 413 тыс.).

Информация по динамике площадей введенных зданий за исследуемый период представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что за 2018–2022 гг. динамика площади введенных зданий жилого назначения выросла с 101,8 до 126,7 млн м². Динамика площади зданий нежилого назначения отличается разноплановостью: в целом можно отметить рост этого показателя на 8,41 % (с 30,9 до 33,5 млн м²). Вырос показатель общей площади введенных зданий на 20,72 % (со 132,7 до 160,2 м²).

Сведения по динамике общего строительного объема введенных зданий показаны на рис. 3.

Данные рис. 3 позволяют отметить, что за период 2018–2022 гг. совокупный показатель общего строительного объема введенных зданий вырос

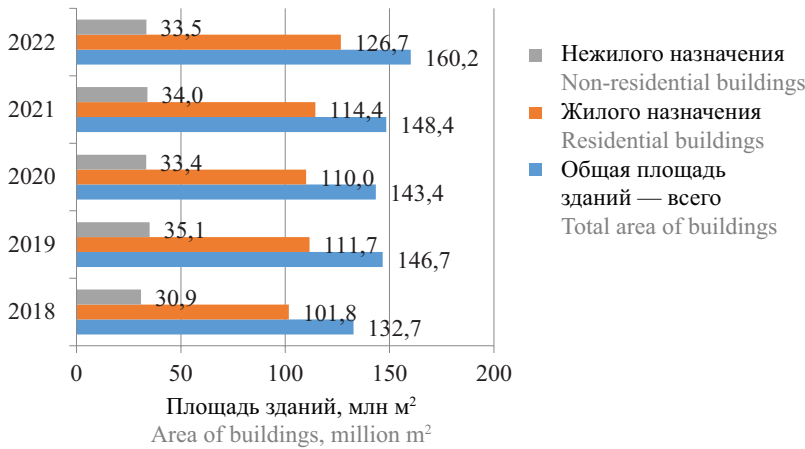


Рис. 2. Динамика площади введенных зданий в Российской Федерации за период 2018–2022 гг., м²

Fig. 2. A change in the area of buildings commissioned in the Russian Federation in 2018–2022, m²

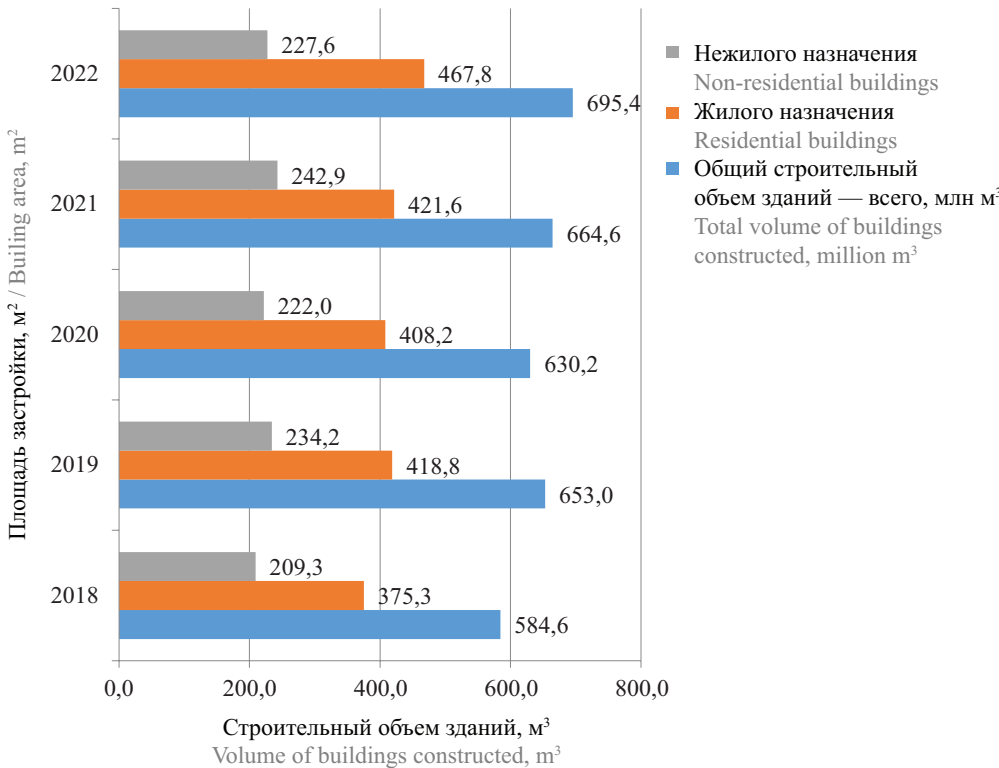


Рис. 3. Динамика общего строительного объема введенных зданий в Российской Федерации за период 2018–2022 г., млн м³

Fig. 3. A change in the total volume of buildings constructed and commissioned in the Russian Federation in 2018–2022, million m³

на 18,95 % (с 584,6 до 695,4 млн м³). На 24,64 % вырос строительный объем введенных жилых зданий (с 375, 3 до 467,8 млн м³). Несмотря на разноплановую динамику, за исследуемый период на 8,74 % вырос строительный объем введенных нежилых зданий (с 209,3 до 227,6 млн м³).

В таблице представлена информация по среднегодовому темпу роста показателей возведенных зданий (количество, площадь, объем).

Рассматривая темпы роста приведенных значений введенных зданий по годам, отметим, что на-

блюдается положительная динамика по количеству зданий нежилого назначения, при этом данный показатель снижается по объему и площадям (табл.).

Из таблицы видно, что за 2021–2022 гг. наблюдается уменьшение темпов роста объектов жилой недвижимости при одновременном росте ее объемов и площадей. Также стоит отметить за 5 лет увеличение темпов роста количества зданий нежилого назначения при одновременном уменьшении среднегодового темпа роста по показателю строительного объема и площади зданий нежилого назначения.

Динамика среднегодового темпа роста показателей возведенных зданий (количество, площадь, объем) в Российской Федерации за период 2018–2022 гг.

A change in the average annual growth rate of buildings constructed (number, area, volume) in the Russian Federation in 2018–2022

Показатель Characteristic	2018	2019	2020	2021	2022	Среднегодовой темп роста Average annual growth rate
Общее количество введенных зданий Total number of buildings commissioned	0,957814	1,17005	1,069394	1,233854	1,0768	0,023697
Здания жилого назначения Residential buildings	0,955083	1,179043	1,077677	1,244805	1,0772	0,024362
Здания нежилого назначения Non-residential buildings	0,994681	1,053476	0,949239	1,053476	1,068629	0,014445
Общий строительный объем зданий — всего, млн м³ Total volume of buildings constructed, million m³	0,975309	1,117003	0,965084	1,054586	1,046393	0,01417
в том числе: including:						
Общий строительный объем зданий жилого назначения Total volume of residential buildings	0,935211	1,115907	0,97469	1,032827	1,109654	0,034798
Общий строительный объем зданий нежилого назначения Total volume of non- residential buildings	1,056537	1,118968	0,947908	1,094144	0,937023	–0,02372
Общая площадь зданий — всего, млн м² Total area of buildings, million m²	0,966497	1,105501	0,977505	1,034868	1,079445	0,022351
в том числе: including:						
Общая площадь зданий жилого назначения Total area of residential buildings	0,973231	1,09725	0,984781	1,04	1,107304	0,026148
Общая площадь зданий нежилого назначения Total area of non-residential buildings	0,944954	1,135922	0,951567	1,017964	0,985709	0,008481

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство на современном этапе представляет собой сложный циклический процесс, состоящий из дополнительных и сопроводительных услуг на каждом из этапов ЖЦ строительства.

К отдельным проблемам развития российского строительного рынка проявляет интерес целый ряд исследователей, которые раскрывают различные аспекты этой проблемы. В то же время оценка состояния и ключевых тенденций рынка строительных организаций полного цикла остается изученной в недостаточной степени.

Далее необходимо было уточнить причины и факторы, влияющие на рынок строительных организаций полного цикла. Результаты приведены ниже.

Обращение к научной литературе [5] показывает, что ключевым фактором повышения конкурентоспособности строительных организаций служит внедрение инноваций и технологий, ускоряющих и упрощающих процесс строительства, снижая его себестоимость. По мнению экспертов Сбербанка, к числу ведущих причин роста строительного рынка на период 2023–2024 гг. следует отнести уход иностранных подрядчиков с российского строительного рынка, реализацию крупнейших государственных и муниципальных проектов и строительство транспортной инфраструктуры для внутреннего туризма¹. На этом фоне традиционно малопривлекательным для застройщиков является механизм ценообразования при государственных закупках: непривлекательность госзаказа для строительных организаций в силу несовершенства тендеров приводит к тому, что крупные игроки строительного рынка избегают подобных контрактов. Таким образом, развитие строительной отрасли зависит от политических, социальных и экономических факторов [6].

Сдерживает развитие строительного рынка ряд факторов: 1) не ведется учет консолидированной потребности в строительстве объектов; 2) неравномерное распределение производства; 3) отсутствие необходимого строительного оборудования, способного заменить зарубежные аналоги; 4) зависимость российского производства стройматериалов от импорта зарубежных технологий, строительного оборудования, сырья и материалов. Кроме того, следует особо подчеркнуть, что в силу локализации строительного бизнеса на определенной территории риски нарушения устойчивого положения строительных организаций отличаются региональными особенностями, которые влияют на бизнес-среду. Анализ показателей развития строительной отрасли в разрезе регионов показывает, что она имеет разноплановую динамику, представленную лидирующими регионами по строительству и отстающими ре-

гионами в этой сфере в натуральном и стоимостном выражении [7]. Поэтому государственная поддержка строительной отрасли должна учитывать такие показатели, как темпы ввода жилья в эксплуатацию, обеспеченность населения жильем, особенности региональных строительных рынков [8, 9].

Преодоление кризисных явлений в строительной отрасли требует поддержки со стороны государства. К наиболее важным из них следует отнести снижение налоговой нагрузки, развитие программ льготной ипотеки, поэтапное использование средств на эскроу-счетах до завершения проекта [10]. Хотя в то же время целый ряд ведомств вместе с Центробанком считают, что программы льготной ипотеки служат фактором роста цен на жилье.

Перспективным подходом к управлению строительным бизнесом признается цифровая трансформация (ЦТ) в отношении производственных процессов. Согласно оценкам экспертов, уровень ЦТ российской строительной отрасли на современном этапе, несмотря на проводимую политику цифровизации внутренних и внешних процессов, оценивается как низкий [11]. То есть говорить о цифровой зрелости строительной отрасли в настоящее время преждевременно. Важность ЦТ заключается в том, что она способна ускорить цикл строительных работ, обеспечивая их эффективность и прозрачность. Перспективы развития отрасли специалисты и исследователи связывают с необходимостью внедрения концепции «Строительство 4.0» (киберфизические системы, робототехника, мобильные и облачные вычисления, интернет вещей и др.), которая обеспечивает автоматизацию всех этапов ЖЦ строительного проекта с помощью цифровых двойников (ЦД). По мнению исследователей, оцифровка процессов и результатов реализации строительных проектов позволит обеспечить производительность отрасли, ускорить информационный обмен, правильно вести цифровой документооборот [12].

Поэтому ускорение инвестиционно-строительных циклов требует интеграции способов административной и ЦТ. Серьезным барьером для ускорения цикла строительных работ является проведение различных видов государственной экспертизы. Определяет кризисные тренды в строительстве недостаток рабочей силы различной квалификации. Ужесточение миграционной политики в РФ в 2024 г. оказывает также сильное влияние на эти процессы. Поэтому с опорой на мировой опыт основной акцент следует делать на технологические сдвиги посредством внедрения в строительную отрасль цифровых технологий, позволяющих с одной стороны ускорить скорость реализации проектов в сфере строительства, с другой — не зависеть от труда низкой квалификации, повысить производительность труда в отрасли за счет цифровых инноваций. Именно в этом направлении сегодня необходимо развивать территориальные инструменты развития и ЦТ

¹ Гусятников П. Барометр отрасли: рынок строительного подряда // СберПро. URL: <https://sber.pro/publication/barometr-otrasli-rinok-stroitel'nogo-podryada/>

строительной отрасли в регионах для обеспечения ее устойчивого и бесконфликтного развития [13]. Главный вопрос заключается в том, кто будет развивать эти инструменты. Современные реалии цифровой экономики указывают на то, что обладание отдельными участниками рынка строительства большим массивом данных позволяет получить рыночную власть, представления о которой существенно изменились после применения цифровых технологий. Рассуждая о рыночной власти строительных фирм, китайские ученые на основе результатов эмпирического исследования пришли к выводу о том, что рыночная власть увеличивает прибыль строительных организаций, но одновременно снижает их оборот, влечет негативные макроэкономические последствия [14–16]. Рыночная власть положительно коррелирует с прибылью. К похожим мнениям приходят и индийские исследователи вне зависимости от принадлежности к отрасли [17]. Отношение операционной прибыли к обороту в работе китайских исследователей рассматривается как рыночная власть. Кроме того, высокую рыночную концентрацию следует более тщательно регулировать со стороны государства: стоит создавать механизмы распределения рынка строительных организаций полного цикла.

Установлено, что обладание большими данными позволяет злоупотреблять в строительной сфере. В то же время большие данные являются персональными данными, которые необходимо защищать посредством режима доступа. Работа с подобными данными на программном обеспечении конкурентов представляет угрозу информационной безопасности для компании. Обеспечение конкурентной среды в подобных условиях служит приоритетом антимонопольного регулирования [18].

В таких ситуациях формируются условия для картельных сговоров в электронном виде, сетевые эффекты от которых выражаются в способности застройщика оказывать влияние на рынок путем координации ценовой политики. Доминирующее положение строительных организаций на рынке — предмет внимания со стороны антимонопольного права. Однако проблемным моментом использования традиционных способов анализа рынка в условиях цифровой среды служит недостаточная их способность к четкому определению продуктовых и географических границ рынка. Прибыль и оборот компаний в условиях цифровой экономики не являются критериями рыночной власти, потому что они не соответствуют особенностям рыночных отношений в условиях цифровой экономики [19]. Поэтому для задач регулирования строительного рынка требуются разработки альтернативных критериев (например, сетевые эффекты либо режим доступа к Big Data).

В настоящее время строительные организации полного цикла (ГК «ПИК», INGRAD, ГК «Само-

лет», Группа «ЛСР», ГК «Основа», Донстрой, ФСК, Setl Group, Эталон и др.) инвестируют средства в создание цифровых экосистем и в запуск мобильных приложений. На рынке строительных организаций полного цикла компаний с высокими показателями ввода жилья и цифровизации бизнеса уже более 27 %².

В данном контексте интересную точку зрения демонстрирует О.В. Васильева, которая считает, что антимонопольное законодательство и административные барьеры выступают основной причиной, сдерживающей расширение масштабов инновационной активности строительных компаний [20]. Чрезмерное регулирование строительных монополий нарушает стабильное функционирование и развитие рынка строительных организаций полного цикла. Исследователь полагает, что отрасль нуждается в регулировании оборота использования цифровых технологий. И у Минстроя РФ, и у девелоперов — разные взгляды на цифровизацию строительной отрасли. Требуется своего решения проблема объединения административных процедур и информационных систем в «одно окно». Пока эта задача не решена, картельные группы в строительной и смежных сферах и дальше будут нарушать законодательство, ограничивая конкуренцию, и негативно влиять на повышение цен на рынке недвижимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведение итогов статьи позволяет прийти к выводу о том, что строительные организации полного цикла играют ведущую роль в функционировании российской строительной отрасли, что подтверждается статистическими данными по реализации крупных инвестиционно-строительных проектов. Анализ мнений экспертов и ученых показывает, что их реализация часто происходит в условиях жесткой конкуренции, удорожания строительных материалов, непрозрачной бизнес-среды и в рамках антиконкурентных соглашений. Рынок строительных организаций полного цикла отличают структурные и пространственные диспропорции. Поэтому важное значение имеет анализ статистических данных, объясняющих тенденции и результативность на российском рынке строительных организаций полного цикла.

Анализ статистических данных показывает, что за последние 5 лет наблюдается положительная динамика строительства жилой недвижимости (более 70 % прироста). Кроме того, этот показатель ежегодно растет по критерию площади. Незначительный прирост демонстрирует строительство зданий нежилого назначения. При этом ежегодно уменьшается площадь и объемы строительства зданий нежилого назначения. Анализ динамики сред-

² Эксперты назвали самых цифровых девелоперов России // РБК. URL: <https://realty.rbc.ru/news/6076e03d9a79476f59-10226d>

негодового темпа роста показателей возведенных зданий (количество, площадь, объем) в Российской Федерации за период 2018–2022 гг. позволяет прийти к выводу об отрицательной динамике темпов роста возведенных зданий жилой недвижимости при одновременном росте площадей и объемов строительства. То есть можно сделать вывод о тенденции к росту размера площади на каждое возводимое здание. Негативную динамику демонстрирует среднегодовой темп роста по критерию общего объема строительного объема зданий нежилого назначения. Поэтому государственное регулирование строительной отрасли должно учитывать в разрезе каждого региона структурные и территориальные диспропорции (по критериям темпов ввода жилья, площади и объемов строительства) развития рынка строительных организаций полного цикла посредством усиления либо, наоборот, ослабления административных барьеров в отношении высококонцентрированных строительных рынков. Для этих целей регулятор должен использовать не только традиционные критерии для анализа рынка (продуктовые и географические границы рынка), но и альтернативные, которые учитывают применение цифровых технологий в строительстве (сетевые эффекты либо режим доступа к Big Data). В итоге на первый план выходит необходимость цифрового регулирования строительной отрасли.

Однако результативность строительной отрасли не объясняет организационные проблемы строительных организаций полного цикла. Основываясь на мнении ряда зарубежных ученых, можно сделать вывод о большей диверсифицированности и конкурентоспособности строительных организаций полного цикла в силу интеграции ресурсов проектных и строительно-подрядных подсистем. Обеспечивает

подобную диверсификацию переход строительных организаций полного цикла на цифровые технологии, применение которых значительно ускоряет реализацию полного цикла строительных работ и способно заменить рабочую силу зарубежных трудовых мигрантов низкой квалификации, делая строительство инновационной высокотехнологичной отраслью. По мнению экспертов Минстроя РФ, игнорирование технологического фактора в ближайшей перспективе будет означать уход со строительного рынка. Интеграция усилий девелопмента и IT-сектора в значительной степени будет способствовать сокращению операционного цикла. На современном этапе отмечается удорожание цены рабочей силы. Ее сопоставимость с ценой инноваций будет определять переход на цифровые технологии.

На основе теоретического анализа литературы установлено, что целый ряд административно-правовых и политических детерминант оказывают сдерживающее воздействие на рынок строительных организаций полного цикла. Отказ зарубежных девелоперов от работы на российском рынке, проблемы регулирования отрасли со стороны государства (налоги, экспертиза, эскроу-счета и др.) оказывают тормозящее воздействие на всех циклах строительных работ. На основе мнений исследователей установлено, что автоматизация всех этапов ЖЦ инвестиционно-строительного проекта с помощью ЦД способна повысить производительность труда строительных организаций полного цикла и преодолеть административные барьеры, т.е. выиграть конкуренцию при реализации девелоперского цикла.

Перспективу дальнейшего исследования составляют актуальные вопросы развития региональных рынков строительных организаций полного цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киселева Е.Н., Шатохин М.В., Жахов Н.В., Сурай Н.М. Влияние развития строительного рынка на функционирование социально-экономической системы региона // Экономика. Профессия. Бизнес. 2023. № 1. С. 42–51. DOI: 10.14258/epb202305. EDN IRKKEC.
2. Далаков А.М. Статистический анализ деятельности строительной отрасли в России // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 4–4 (106). С. 95–100. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.122. EDN BDKSXM.
3. Лебедева А.Е., Каракозова И.В. Анализ строительного рынка в России и за рубежом с целью сдерживания роста стоимости строительства и обеспечения конкурентоспособности предприятий путем повышения эффективности системы учета и контроля затрат // Управленческие науки. 2023. Т. 13. № 4. С. 105–117. DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-4-105-117. EDN APVKMO.
4. Kim H.J., Reinschmidt K. Market Structure and Organizational Performance of Construction Organizations // Journal of Management in Engineering. 2012. Vol. 28. Issue 2. Pp. 212–220. DOI: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000082
5. Москвичев М.А. Анализ современного состояния строительной отрасли в Российской Федерации // Экономическое развитие России. 2023. Т. 30. № 6. С. 14–22. EDN WSMEXK.
6. Милушенко О.А. Анализ рынка строительных услуг: особенности и тенденции развития в России в современных условиях // Бизнес. Образование. Право. 2023. № 3 (64). С. 13–18. DOI: 10.25683/VOLBI.2023.64.676. EDN HVGIWI.
7. Берлизев Р.Н., Борисова К.С. Проблемы и перспективы развития строительной отрасли в России // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 9–1 (79). С. 28–32. DOI: 10.24412/2411-0450-2021-9-1-28-32. EDN XABEJJ.

8. Зубреев А.О. Экономический анализ современного состояния промышленно-строительного комплекса // Естественно-гуманитарные исследования. 2022. № 44 (6). С. 105–109. EDN ZGQKSR.

9. Аблязов Т.Х., Ширишков С.П. Проблемы реализации потенциала роста строительной сферы // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 5. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_5_299. EDN ZULTZX.

10. Занина Е.В. Анализ современного состояния и основных тенденций развития строительного рынка и его отдельных сегментов // Столыпинский вестник. 2023. Т. 5. № 4. EDN SOSAHY.

11. Абдрахманова Г.И., Васильковский С.А., Вишневский К.О., Гохберг Л.М., Демидкина О.В., Демьянова А.В. и др. Цифровая экономика: 2023 : краткий статистический сборник. М. : НИУ ВШЭ, 2023. 120 с. DOI: 10.17323/978-5-7598-2744-3. EDN WTVQTG.

12. Пешков А.В., Матвеева М.В., Безруких О.А., Рогов Д.С. Обеспечение процессов контроля качества на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства в рамках концепции «Строительство 4.0» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1 (40). С. 90–97. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-1-90-97. EDN AINCLW.

13. Викторов М.Ю., Яськова Н.Ю. Стратегические ракурсы развития строительства: направления, трансформации, человеческий капитал // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1 (40). С. 10–19. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-1-10-19. EDN NIXNRT.

14. De Loecker J., Eeckhout J., Unger G. The rise of market power and the macroeconomic implications // The Quarterly Journal of Economics. 2020. Vol. 135. Issue 2. Pp. 561–644. DOI: 10.1093/qje/qjz041

15. Yang H., Chan A.P.C., Yeung J.F.Y., Li Q. Concentration effect on construction firms: Tests of resource partitioning theory in Jiangsu province (China) from 1989 to 2007 // Journal of Construction Engineering and Management. 2012. Vol. 138. Issue 1. Pp. 144–153. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000416

16. Wang Y., Li S. Market concentration, market power, and firm growth of construction companies // Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2021/9990846

17. Raj A., Gupta U., Tiwari P., Singh A.K. Market power analysis of the Indian power market // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2021. Vol. 13. Issue 1. Pp. 39–47. DOI: 10.4314/ijest.v13i1.6s

18. Цариковский А.Ю., Галимханова Н.Ф., Тенишев А.П. и др. Антимонопольное регулирование в цифровую эпоху: как защищать конкуренцию в условиях глобализации и четвертой промышленной революции: цифровая идентичность, сетевые эффекты, ценовые алгоритмы, цифровые платформы, большие данные, многосторонние рынки : монография. 2-е изд., испр. и доп. М. : Изд. дом Высш. шк. экономики, 2019. 391 с.

19. Белых В.С., Болобонова М.О., Коньков К.А. Проблемы и перспективы определения доминирующего положения в условиях цифровой экономики // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). 2020. № 11 (75). С. 202–210. DOI: 10.17803/2311-5998.2020.75.11.202-210. EDN NSJLIK.

20. Васильева О.В. Картель в инвестиционно-строительной сфере // Журнал прикладных исследований. 2023. № 2. С. 34–43. DOI: 10.47576/2712-7516_2023_2_34. EDN OUKOSD.

Поступила в редакцию 23 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 4 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 10 июля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юлия Александровна Лаамарти** — кандидат социологических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет)**; 125167, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2; Laamarti@yandex.ru;

Евгений Геннадьевич Дедов — кандидат педагогических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента; **Смоленский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации (Смоленский филиал Финуниверситета)**; 214018, г. Смоленск, пр-т Гагарина, д. 52; EvgeniyD15@yandex.ru;

Александр Александрович Николаев — кандидат социологических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента; **Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет)**; 125167, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2; alexnikolson@mail.ru.

Вклад авторов:

Лаамарти Ю.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Дедов Е.Г. — научное редактирование текста, доработка текста.

Николаев А.А. — доработка текста и итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kiseleva E.N., Shatokhin M.V., Zhakhov N.V., Suray N.M. The role of the construction market in the socio-economic development of regional systems: an empirical analysis. *Economics. Profession. Business.* 2023; 1:42-51. DOI: 10.14258/epb202305. EDN IRKKEC. (rus.).
2. Dalakov A.M. Statistical analysis of the construction industry in Russia. *International Research Journal.* 2021; 4-4(106):95-100. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.122. EDN BDKSXM. (rus.).
3. Lebedeva A.E., Karakozova I.V. Analysis of the construction market in Russia and abroad in order to curb the growth of construction costs and ensure the competitiveness of enterprises by increasing the efficiency of the cost accounting and control system. *Management Sciences.* 2023; 13(4):105-117. DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-4-105-117. EDN APVKMO. (rus.).
4. Kim H.J., Reinschmidt K. Market structure and organizational performance of construction organizations. *Journal of Management in Engineering.* 2012; 28(2):212-220. DOI: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000082
5. Moskvichev M.A. Analysis of the current state of the construction industry in the Russian Federation. *Russian Economic Developments.* 2023; 30(6):14-22. EDN WSMEXK. (rus.).
6. Miliushenko O.A. Analysis of the construction services market: features and trends of development in Russia in modern conditions. *Business. Education. Law.* 2023; 3(64):13-18. DOI: 10.25683/VOLBI.2023.64.676. EDN HVGIWI. (rus.).
7. Berlizev R.N., Borisova K.S. Problems and prospects of development of the construction industry in Russia. *Economics and Business: Theory and Practice.* 2021; 9-1(79):28-32. DOI: 10.24412/2411-0450-2021-9-1-28-32. EDN XABEJJ. (rus.).
8. Zubreev A.O. Economic analysis of the current state of the industrial and construction complex. *Natural Sciences and Humanities Research.* 2022; 44:105-109. EDN ZGQKSR. (rus.).
9. Ablyazov T.Kh., Shirshikov S.P. Problems of realizing the growth potential of the construction industry. *Moscow Economic Journal.* 2022; 7(5). DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_5_299. EDN ZULTZX. (rus.).
10. Zanina E.V. Analysis of the current state and main trends in the development of the construction market and its individual segments. *Stolybinsky Bulletin.* 2023; 5(4). EDN SOSAHY. (rus.).
11. Abdrakhmanova G.I., Vasilkovsky S.A., Vishnevsky K.O., Gokhberg L.M., Demidkina O.V., Demyanova A.V. et al. *Digital Economy: 2023: short statistical collection.* Moscow, National Research University Higher School of Economics, 2023; 120. DOI: 10.17323/978-5-7598-2744-3. EDN WTVQTG. (rus.).
12. Peshkov A.V., Matveeva M.V., Bezrukikh O.A., Rogov D.S. Ensuring quality control processes at all stages of the life cycle of capital construction projects under the construction 4.0 concept. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022; 12(1):90-97. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-1-90-97. EDN AIHCLW. (rus.).
13. Viktorov M.Yu., Yaskova N.Yu. Strategic aspects in construction development: directions, transformations, human capital. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022; 12(1):10-19. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-1-10-19. EDN NIXNRT. (rus.).
14. De Loecker J., Eeckhout J., Unger G. The Rise of Market Power and the Macroeconomic Implications. *The Quarterly Journal of Economics.* 2020; 135(2): 561-644. DOI: 10.1093/qje/qjz041
15. Yang H., Chan A.P.C., Yeung J.F.Y., Li Q. Concentration effect on construction firms: Tests of resource partitioning theory in Jiangsu province (China) from 1989 to 2007. *Journal of Construction Engineering and Management.* 2012; 138(1):144-153. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000416
16. Wang Y., Li S. Market concentration, market power, and firm growth of construction companies. *Advances in Civil Engineering.* 2021; 2021:1-9. DOI: 10.1155/2021/9990846
17. Raj A., Gupta U., Tiwari P., Singh A.K. Market power analysis of the Indian power market. *International Journal of Engineering, Science and Technology.* 2021; 13(1):39-47. DOI: 10.4314/ijest.v13i1.6s
18. Tsarikovsky A.Yu., Galimkhanova N.F., Tenishchev A.P. et al. *Antitrust regulation in the digital age: how to protect competition in the context of globalization and the fourth Industrial Revolution: digital identity, network effects, pricing algorithms, digital platforms, big data, multilateral markets : monograph.* Moscow, Publishing House of Higher School Economics, 2019; 391. (rus.).
19. Belykh V.S., Bolobonova M.O., Konkov K.A. Issues and prospects of determining the dominant position in the conditions of the digital economy. *Courier of the Kutafin Moscow State Law University (MSAL).* 2020; 11(75):202-210. DOI: 10.17803/2311-5998.2020.75.11.202-210. EDN NSJIIK. (rus.).
20. Vasilyeva O.V. Cartel in the investment and construction sector. *Journal of Applied Research.* 2023; 2:34-43. DOI: 10.47576/2712-7516_2023_2_34. EDN OUKOSD. (rus.).

Received May 23, 2024.

Adopted in revised form on July 4, 2024.

Approved for publication on July 10, 2024.

B I O N O T E S: **Yulia A. Laamarti** — Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49/2 Leningradsky avenue, Moscow, 125167, Russian Federation; Laamarti@yandex.ru;

Evgeny G. Dedov — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management; **Smolensk branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation (Smolensk branch of the Financial University)**; 52 Gagarin avenue, Smolensk, 214018, Smolensk, Russian Federation; EvgeniyD15@yandex.ru;

Alexander A. Nikolaev — Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49/2 Leningradsky avenue, Moscow, 125167, Russian Federation; alexnikolson@mail.ru.

Contribution of the authors:

Yulia A. Laamarti — scientific guidance, research concept, development of methodology, writing the source text, final conclusions.

Evgeny G. Dedov — scientific text editing, text revision.

Alexander A. Nikolaev — revision of the text and final conclusions.

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 источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).
2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).
2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

