

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 19 Выпуск 6/2024
Vol. 19 Issue 6/2024

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 6
2024**

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

Сквозной номер 187

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 6
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	25.06.2024.
Подписан в свет	28.06.2024.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 24,49. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 163

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

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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:	28.06.2024

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

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

Г.И. Ремпель, А.М. Бударин, А.П. Долгих, А.А. Камзолкин, В.Н. Алехин

Обзор и сравнительный анализ критериев прочности для моделирования нелинейного поведения бетона 857

В.С. Маркеев, В.В. Зверев, И.А. Зайцев

Влияние шага ребер жесткости на напряженно-деформированное состояние элементов подкрановой балки 878

К.Л. Кудряков, А.В. Бучкин

Особенности проектирования монолитных бетонных фундаментных плит с композитной полимерной арматурой 892

С.Г. Саиян, А.М. Ефимова

Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий 906

А.Р. Туснин, И.В. Мыльников

Быстрособорные узлы в стальных каркасах многоэтажных зданий 942

В.Н. Сидоров, Е.С. Бадьина, Д.О. Климушкин

Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях 960

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Р.А. Горшков, С.В. Корниенко

Влияние климата и наружной штукатурки на влажностный режим каменных стен 971

М.С. Панова, Н.А. Татусь

Анализ прочностных и теплопроводных характеристик слоистых балок, состоящих из массива дерева и теплоизоляционного материала 982

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.З. Тер-Мартirosян, В.В. Рудь

Аналитическое определение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при проходке 991

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.В. Сокольников, М.В. Молодцов

Информатизация организации строительного производства и оперативного управления 1006

М.Р. Сафиуллин, Л.А. Ельшин, А.А. Динмухаметова, А.Р. Шарапов

Блокчейн-транзакции как перспективный механизм обеспечения устойчивого развития строительного комплекса в условиях санкций (на примере экономики РФ) 1016

А.А. Кузьменков, А.В. Кайчёнов

Критерии выбора технологий экологически безопасного строительства в Арктике 1031

Требования к оформлению научной статьи 1047

CONTENTS

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

Georgy I. Rempel, Alexander M. Budarin, Andrey P. Dolgikh, Alexey A. Kamzolkin, Vladimir N. Alekhin

Review and comparative analysis of strength criteria for modelling non-linear behaviour of concrete 857

Vladislav S. Markeev, Vitalij V. Zverev, Ilyá A. Zajcev

The effect of the stiffener pitch on the stress-strain state of the crane beam elements 878

Konstantin L. Kudyakov, Andrey V. Buchkin

Design of monolithic concrete foundation slabs with FRP reinforcement 892

Sergey G. Saiyan, Alexandra M. Efimova

Computational Aerodynamic Studies of the MIBC “Moscow-City” Complex during Sequential Construction of Buildings 906

Alexander R. Tusnin, Ivan V. Myl'nikov

Quick-assembly units in steel frames of multi-storey buildings 942

Vladimir N. Sidorov, Elena S. Badina, Dmitriy O. Klimushkin

Modification of Rayleigh dissipation function for numerical simulation of internal damping in rod structures 960

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Rostislav A. Gorshkov, Sergey V. Kornienko

Influence of climate and external plaster on the humidity conditions of masonry walls 971

Maria S. Panova, Nikolay A. Tatus

Analysis of strength and thermal conductivity characteristics of layered beams consisting of solid wood and thermal insulation material 982

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Armen Z. Ter-Martirosyan, Victoria V. Rud

Analytical determination of the stress-strain state of soil mass during tunnelling 991

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Vladimir V. Sokolnikov, Maksim V. Molodtsov

Informatization of construction production organization and operational management 1006

Marat R. Safiullin, Leonid A. Elshin, Aliya A. Dinmukhametova, Azat R. Sharapov

Blockchain transactions as a promising mechanism to ensure sustainable development of the construction complex under sanctions (by the example of the Russian economy). 1016

Alexander A. Kuzmenkov, Alexander V. Kaychenov

Environmentally friendly construction technologies selection criteria in the Arctic. 1031

Requirements for research paper design 1047

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).

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.857-877

Обзор и сравнительный анализ критериев прочности для моделирования нелинейного поведения бетона

Георгий Игоревич Ремпель¹, Александр Михайлович Бударин¹,
Андрей Петрович Долгих¹, Алексей Александрович Камзолкин²,
Владимир Николаевич Алехин³

¹ АО «Институт Гидропроект»; г. Москва, Россия;

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

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние десятилетия значительное развитие получили численные методы расчета бетонных и железобетонных конструкций, учитывающие физически нелинейное поведение материала. Подобные методы, по сравнению с аналитическими, позволяют точнее описать работу материала и отразить основные особенности его напряженно-деформированного состояния. Это дает возможность выполнять более экономичные, а в ряде случаев, и более надежные конструктивные решения. Одну из ключевых ролей в численных методах занимает понятие предельной поверхности, которая выражается в виде условия (критерия прочности), разделяя области упругой и пластической работы материала. Критерий прочности для бетона должен соответствовать опытным данным, обеспечивать математически стабильное, уникальное решение, а также иметь набор параметров, легко определяемый на основании эмпирических зависимостей или результатов испытаний. История создания и совершенствования предельных поверхностей бетона насчитывает десятки отечественных и зарубежных работ, многие из которых не удовлетворяют этим требованиям. Цель исследования — сравнительный анализ наиболее распространенных в мировой практике критериев прочности бетона.

Материалы и методы. В качестве основы использованы результаты анализа и систематического обобщения данных, полученных из отечественных и зарубежных источников.

Результаты. Проведен детальный анализ наиболее распространенных отечественных и зарубежных критериев прочности бетона.

Выводы. Согласно результатам проведенного анализа, выполнено сравнение предельных поверхностей бетона на предмет соответствия ряду требований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, критерий прочности, предельная поверхность, численное моделирование, модель материала, физическая нелинейность, прочность, разрушение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ремпель Г.И., Бударин А.М., Долгих А.П., Камзолкин А.А., Алехин В.Н. Обзор и сравнительный анализ критериев прочности для моделирования нелинейного поведения бетона // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 857–877. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.857-877

Автор, ответственный за переписку: Георгий Игоревич Ремпель, g.rempel@hydroproject.ru.

Review and comparative analysis of strength criteria for modelling non-linear behaviour of concrete

Georgy I. Rempel¹, Alexander M. Budarin¹, Andrey P. Dolgikh¹,
Alexey A. Kamzolkin², Vladimir N. Alekhin³

¹ JSC «Institute Hydroproject»; Moscow, Russian Federation;

² Scientific Research Center “StaDiO” (JSC NRC “Stadyo”); Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. In recent decades, numerical methods for calculating concrete and reinforced concrete structures have developed significantly, taking into account the physically nonlinear behavior of the material. Such methods, in comparison with analytical ones, make it possible to describe the work of the material more accurately and reflect the main features of its stress–strain state. This makes it possible to perform more cost-effective and, in some cases, more reliable design solutions. Concept of the limit surface plays an important role in numerical methods. Limit surface, which is expressed by a condition (strength criterion), separates the elastic and plastic region of the material. Strength criteria must correspond to experimental data, provide a mathematically stable unique solution, and also have a set of parameters that can be easily determined from empirically based expressions or test data. The history of creation and improvement of concrete limit surfaces includes dozens of domestic and foreign works, many of which do not meet these requirements. The purpose of the current work is a comparative analysis of the most common strength criteria of concrete.

Materials and methods. This study is based on the analytical generalization and systematization of the data received from domestic and foreign sources.

Results. A detailed analysis of the most common domestic and foreign concrete limit surfaces was carried out.

Conclusions. According to the analysis results, the comparison of the concrete limit surfaces was performed.

KEYWORDS: concrete, strength criteria, limit surface, numerical modelling, material model, physical nonlinearity, strength, failure

FOR CITATION: Rempel G.I., Budarin A.M., Dolgikh A.P., Kamzolkin A.A., Alekhin V.N. Review and comparative analysis of strength criteria for modelling non-linear behaviour of concrete. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):857-877. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.857-877 (rus.).

Corresponding author: Georgy I. Rempel, g.rempel@hydroproject.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия значительное развитие получили численные методы расчета бетонных и железобетонных конструкций, учитывающие физически нелинейное поведение материала. Подобные методы, по сравнению с аналитическими, позволяют точнее описать работу материала и отразить основные особенности его напряженно-деформированного состояния (НДС). Это дает возможность выполнять более экономичные, а в ряде случаев, и более надежные конструктивные решения. Одну из ключевых ролей в численных методах занимает понятие предельной поверхности, которая выражается в виде условия (критерия прочности), разделяя области упругой и пластической работы или разрушения материала. В общем виде условие имеет следующий вид:

$$f(\sigma_{ij}) \leq 0, \tag{1}$$

где σ_{ij} — тензор напряжений. При выполнении условия (1) материал работает упруго. Предельная поверхность строится в трехмерном пространстве, где координаты точки представлены величинами главных напряжений (пространство Хейга-Вестергаарда). Визуализация пространства главных напряжений представлена на рис. 1.

Таким образом, критерий может быть сформулирован как с помощью главных напряжений, так и с помощью инвариантов тензора напряжений. Предельная поверхность, которая является геометрической интерпретацией критерия прочности, может быть использована в качестве поверхности нагружения, прочности или текучести в рамках феноменологической модели материала, а также быть частью более простых численных или аналитических подходов. История создания и совершенствования предельных поверхностей бетона насчитывает десятки отечественных и зарубежных работ, многие из ко-

торых были разработаны еще в XX в. Значительная часть существующих поверхностей имеет ряд проблем и допущений, ограничивающих их применение в рамках численных методов.

Основные требования к предельной поверхности бетона можно сформулировать следующим образом:

1. Поверхность должна соответствовать результатам опытов. Данное требование подразумевает:

- отсутствие аффинного подобия девиаторных сечений, соответствующих разным степеням гидростатического обжатия (со стремлением величины гидростатического обжатия к минус бесконечности форма девиаторного сечения меняется от треугольной к круглой). Геометрическая интерпретация данного условия изображена на рис. 2;

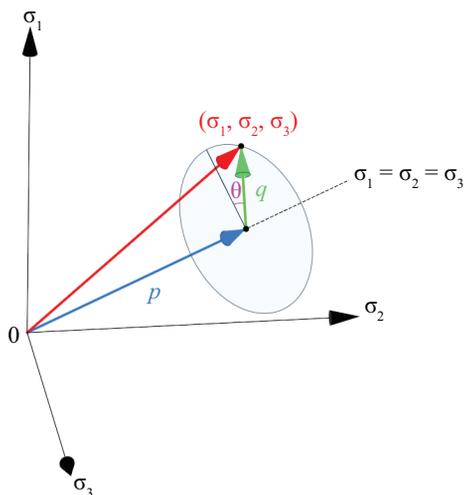


Рис. 1. Визуализация пространства главных напряжений Хейга-Вестергаарда

Fig. 1. Visualization of the Haigh-Westergaard principal stress space

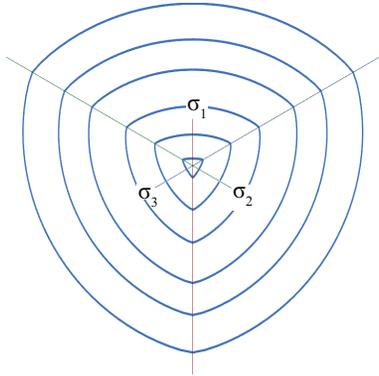


Рис. 2. Отсутствие аффинного подобия девиаторных сечений

Fig. 2. Absence of the affine similarity of the deviatoric sections

• зависимость предельной поверхности от трех инвариантов: I_1 (первый инвариант тензора напряжений), J_2 и J_3 (второй и третий инварианты девиато-

ра тензора напряжений соответственно). Влияние I_1 на функцию предельной поверхности изменяет предел прочности в зависимости от величины гидростатического обжатия. Учет зависимости от J_3 позволяет описывать предельную поверхность с формой девиаторного сечения, отличной от круга. Демонстрация влияния вышеуказанных инвариантов на форму предельной поверхности приведена в табл. 1;

• зависимость функции от второго главного напряжения. Данное условие позволяет отразить криволинейность поверхности в девиаторном сечении. Влияние второго главного напряжения на форму девиаторного сечения поверхности показано на рис. 3.

2. Критерий должен обеспечивать математически стабильное, уникальное решение, что требует выполнения следующих условий:

• отсутствие мнимых упругих зон. Поясним данное требование на примере. На рис. 4, а изображено меридиональное сечение предель-

Табл. 1. Зависимость формы предельной поверхности от инвариантов тензора напряжений

Table 1. Dependence of the limiting surface shape on the stress tensor invariants

Функция Function	Девиаторное сечение Deviatoric section	Меридиональное сечение Meridional section	Общий вид General view
$f(J_2)$			
$f(I_1, J_2)$			
$f(I_1, J_2, J_3)$			

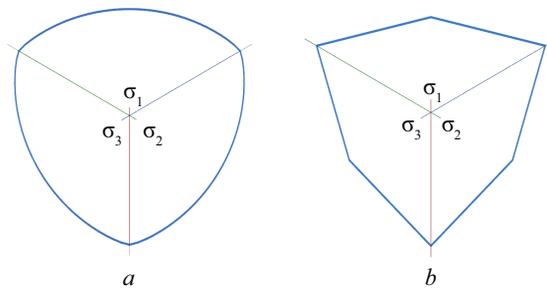


Рис. 3. Влияние формы девиаторного сечения поверхности от второго главного напряжения σ_2 : a — поверхность, зависящая от σ_2 ; b — поверхность, независимая от σ_2

Fig. 3. The influence of the second principal stress σ_2 on the shape of the deviatoric cross section: a — surface dependent on σ_2 ; b — surface independent of σ_2

ной поверхности. Выполняя нагрузку образца при фиксированном гидростатическом обжатии последовательным увеличением девиаторного напряжения, точка будет принимать положения 1–5. Точка 1 находится в упругой зоне ($f < 0$), точка 2 соответствует выходу на поверхность ($f = 0$), в точке 3 происходит пластическая работа материала ($f > 0$). Для того чтобы результат решения

численной задачи был уникальным и не зависел от размера шага нагружения, необходимо чтобы в точках 4 и 5 выполнялось условие $f > 0$ (рис. 5). Однако для критерия с мнимой упругой зоной в точке 4 снова удовлетворяется условие $f = 0$ с дальнейшим переходом в область упругой работы (точка 5, $f < 0$). Таким образом, для траектории нагружения существует две точки (точки 2 и 4), в которых выполняется условие $f = 0$ (см. рис. 4, b).

Для численных методов теории пластического течения дополнительно необходимо удовлетворение следующих требований:

- условие выпуклости поверхности (удовлетворение постулата Друкера). Согласно постулату устойчивости Друкера в цикле нагружения–разгрузки добавочные напряжения выполняют положительную работу, если имели место пластические деформации. Из данного постулата следует, что меридиональные и девиаторные сечения предельной поверхности должны быть выпуклыми;
- поверхность должна обладать минимальным количеством сингулярных зон. Под зоной сингулярности подразумевается область, в которой поверхность является недифференцируемой. Наличие сингулярных зон требует введения дополнительных

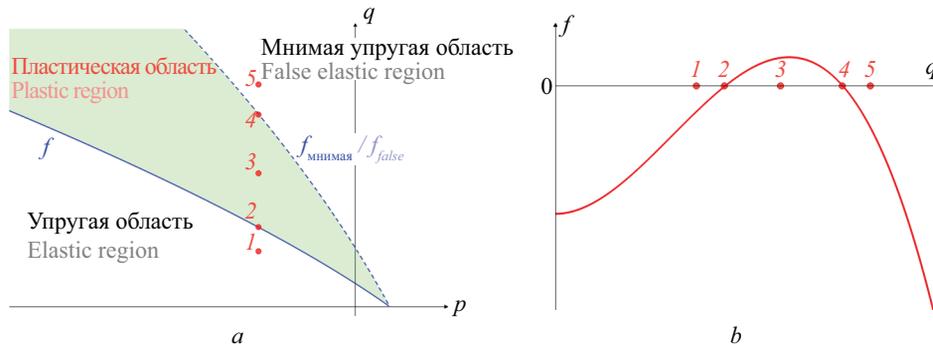


Рис. 4. Предельная поверхность с мнимой упругой областью: a — траектория нагружения в меридиональном сечении; b — зависимость значения функции f от девиаторного инварианта q при фиксированном значении p и угла подобия

Fig. 4. Limit surface with false elastic region: a — loading trajectory in meridional section; b — dependence of the f function from deviatoric invariant q with fixed value of p and similarity angle

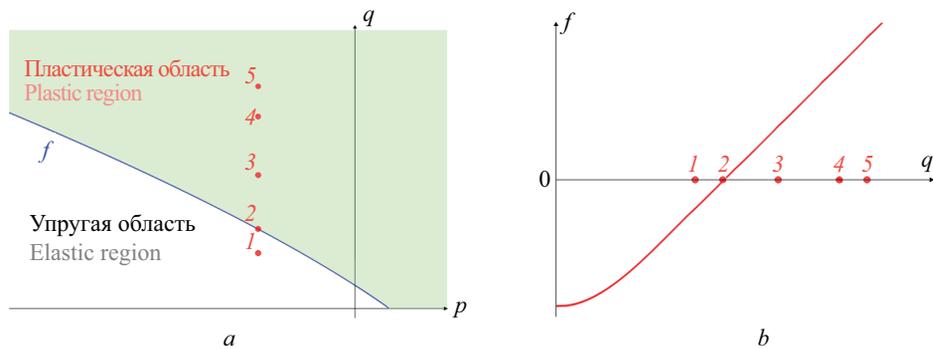


Рис. 5. Предельная поверхность без мнимой упругой области: a — траектория нагружения в меридиональном сечении; b — зависимость значения функции f от девиаторного инварианта q при фиксированном значении p и угла подобия

Fig. 5. Limit surface without false elastic region: a — loading trajectory in meridional section; b — dependence of the f function from deviatoric invariant q with fixed value of p and similarity angle

условий, которые являются одной из причин проблем со стабильностью решения и точностью результатов [1].

3. Параметры, используемые для построения поверхности, должны легко определяться на основании широко распространенных опытов (прочность на одноосное сжатие и растяжение) или эмпирических зависимостей. Данное требование оказывает существенное влияние на удобство использования критерия прочности.

Выполнение этих требований обеспечивает соответствие экспериментальным данным, стабильность численного решения и удобство применения поверхности. Таким образом, актуальной является задача определения критериев прочности бетона, наилучшим образом соответствующих указанным выше требованиям.

Цель исследования — критическое сравнение наиболее распространенных в мировой практике предельных поверхностей бетона. Ранее подобный анализ уже выполнялся в работах [2–4]. Однако авторами не был рассмотрен ряд современных предельных поверхностей, а также отсутствовало их сравнение с точки зрения стабильности работы в рамках численных методов и удобства использования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наиболее удобным для визуального представления поверхности является геометрически правильная, цилиндрическая система координат Хейга-Вестергаарда, представленная следующими инвариантами в качестве осей.

Гидростатический инвариант, численно равный норме шарового тензора напряжений:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \sigma_o \cdot \sqrt{3}, \quad (2)$$

где I_1 — первый инвариант тензора напряжений; σ_o — средние (октаэдрические) напряжения.

Девiatorный инвариант, численно равный норме девiatorа тензора напряжений:

$$q = \sqrt{\frac{1}{3}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} = \sqrt{2 \cdot J_2} = \sqrt{5} \cdot \tau_a = \sqrt{3} \cdot \tau_o = \sqrt{3/2} \cdot \sigma_e, \quad (3)$$

где J_2 — второй инвариант девiatorа тензора напряжений; τ_a — функция девiatorных напряжений из исследования [5]; τ_o — октаэдрические напряжения.

Угол подобия (4), изменяющийся в диапазоне от 0 до 60°, или параметр Лоде-Надаи (5), принимающий значения от -1 до 1:

$$\theta = \frac{1}{3} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right); \quad (4)$$

$$\mu = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}; \quad (5)$$

$$J_3 = s_1 \cdot s_2 \cdot s_3, \quad (6)$$

где J_3 — третий инвариант девiatorа тензора напряжений (6); s_1, s_2, s_3 — главные девiatorные напряжения. Меридиан сжатия соответствует значениям $\theta = 60^\circ$ и $\mu = 1$, меридиан растяжения соответствует значениям $\theta = 0^\circ$ и $\mu = -1$.

В качестве констант для построения предельных поверхностей бетона используются следующие прочностные параметры: R_b — предел прочности на одноосное сжатие; R_{bt} — предел прочности на одноосное растяжение; R_{ct} — предел прочно-

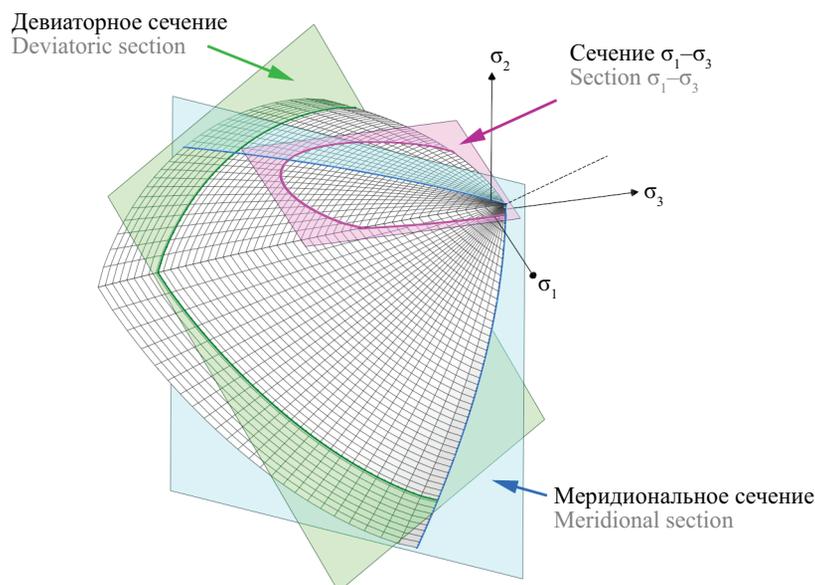


Рис. 6. Расположение сечений для сравнения поверхностей с опытными данными

Fig. 6. Location of cross-sections for comparison of surfaces with experimental data

сти при чистом сдвиге; R_{2b} — предел прочности при двухосном равномерном сжатии; R_{2t} — предел прочности при двухосном равномерном растяжении; $R_{3b} = \sigma^*$ — точка начала контракции (пластической сжимаемости) при трехосном равномерном сжатии; R_{3t} — предел прочности при трехосном равномерном растяжении; σ_{com} и τ_{com} — гидростатическая и девиаторная координаты точки на меридиане сжатия, соответствующей поверхности прочности при неравномерном трехосном сжатии ($\sigma_3 < \sigma_1 = \sigma_2 < 0$). Для каждого критерия прочности, упоминаемого в работе, в скобках указаны параметры, необходимые для его построения. На рис. 7, 9, 12, 14, на которых изображены предельные поверхности в пространстве главных напряжений, красным цветом выделены сингулярности, голубым — области, противоречащие требованию постулата Друкера. Сравнение поверхностей с результатами опытов выполняется в пространстве главных напряжений в цилиндрической системе координат для меридионального и девиаторных сечений (результаты опытов, представленные в трудах [6–23]), а также в сечении по плоскости σ_1 – σ_3 (опыты [24–26]). Расположения сечений показаны на рис. 6.

Для построения поверхностей авторами были использованы программы Mathcad Prime и SpaceClaim в сочетании с языком программирования Python.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первую очередь стоит упомянуть классические критерии прочности, которые в разное время применялись для описания работы бетона, хотя изначально были разработаны для описания поведения других материалов. К ним можно отнести критерии Mises (R_{bt}/R_b) [27], Rankine (R_{bt}) [28], Mohr – Coulomb (R_b, R_{bt}) [4], Drucker – Prager (R_b, R_{bt}) [4], Tresca (R_{bt}/R_b) [3]. Поверхности данной группы не подходят для описания работы бетона, так как у некоторых из них отсутствует зависимость от J_3 (поверхности Mises, Drucker – Prager), от I_1 (поверхности Mises, Tresca), от второго главного напряжения σ_2 (поверхности Rankine, Mohr – Coulomb, Tresca). Все поверхности обладают аффинным подобием девиаторных сечений, имеют существенное отклонение от опытных данных и не рекомендуются для использования в контексте моделирования работы бетона. Детальный анализ этих критериев прочности выполнен в исследованиях [3, 4] и в данной статье представлен не будет.

Помимо классических существует ряд критериев прочности, которые создавались специально для моделирования поведения бетона, но тем не менее имеют существенное отклонение от экспериментальных данных. К ним относятся отечественные работы Г.А. Гениева (R_b, R_{bt}, R_{ct}) [29], Г.А. Гениева – Н.М. Аликовой ($R_b, R_{bt}, R_{ct}, R_{2c}$) [30], Е.С. Лейтеса (R_b, R_{bt}) [31], А.В. Яшина (R_b, R_{bt}) [32], детально рассмо-

тренные в статье [2], а также зарубежные критерии Bresler – Pister (R_b, R_{bt}) [33], Leon (R_b, R_{bt}) [34], Hoek – Brown (R_b, R_{bt}) [4], Reimann (R_b, a, b, c) [3], трех-параметрический Willam – Warnke (R_b, R_{bt}, R_{2b}) [5], рассмотренные в работах [3, 4]. На основании выводов, сделанных в публикациях [2–4], можно заключить, что критерии имеют значительное отклонение от экспериментальных данных в областях неравномерного двухосного сжатия (Г.А. Гениев – Н.М. Аликова, А.В. Яшин, Leon, Hoek – Brown, Bresler – Pister), сжатия-растяжения (Г.А. Гениев, Г.А. Гениев – Н.М. Аликова, Leon, Bresler – Pister), области трехосного сжатия (все поверхности). Эти критерии прочности также не рекомендуется использовать для моделирования поведения бетона.

В настоящей работе будет выполнен детальный анализ критериев, которые либо не были рассмотрены в работах [2–4], либо рассматривались только путем сопоставления предельной поверхности с результатами опытов без учета требований к поверхности с точки зрения удобства использования и математической стабильности. Для более удобного представления критерии разделены на несколько групп.

В первой группе рассмотрим следующие критерии прочности:

1. Критерий Bigoni – Piccolroaz ($M, p_c, c, m, a, \beta, \gamma$) [35] (уравнения (7)–(9)) позиционируется авторами в качестве универсального критерия, позволяющего описывать поведение широкого спектра материалов (бетон, грунт, керамика и т.д.):

$$f_{BP} = F(p) + \frac{\sigma_e}{g(\theta)} \leq 0; \quad (7)$$

$$F(p) = \begin{cases} -M \cdot p_c \cdot \sqrt{\left[\frac{p+c}{p_c-c} - \left(\frac{p+c}{p_c-c} \right)^m \right] \times} \\ \times \left[2 \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{p+c}{p_c-c} + \alpha \right]; \\ + \infty; \end{cases} \quad (8)$$

$$1/g(\theta) = \cos(\beta \cdot \pi / 6 - \cos^{-1}(\gamma \cdot \cos(3 \cdot \theta))). \quad (9)$$

Параметры, требуемые для построения поверхности, не имеют прямого отношения к прочностным характеристикам бетона, получаемым в опытах, что существенно затрудняет их подбор и использование критерия в целом. Авторами критерия представлены рекомендованные для моделирования бетона величины параметров [36], которые были использованы в данной работе при анализе поверхности.

Поверхность, описываемая критерием, имеет неудовлетворительное совпадение с опытными данными во всех представленных сечениях (рис. 8). Прочность бетона переоценивается в областях с малыми величинами ($p/R_b > -1,5$) гидростатического

обжатия и недооценивается при больших величинах гидростатического обжатия ($p/R_b \leq -1,5$). Более того, поверхность имеет аффинное подобие девиаторных сечений.

При использовании рекомендованного для бетона набора параметров образуется точечная сингулярность в вершине поверхности в области трехосного сжатия (см. рис. 7, а).

2. Критерий Drucker – Prager Concrete (R_b, R_{bt}, R_{2b})¹, используемый в рамках одноименной модели бетона в конечно-элементном комплексе ANSYS, состоит из двух функций: f_{DPt} (10) и f_{DPc} (11). В отличие от классической поверхности Drucker – Prager (R_b, R_{bt}) [4], которая переоценивает прочность бетона при больших гидростатических обжатиях, для критерия Drucker – Prager Concrete была произведена попытка решить эту проблему путем добавления дополнительной функции f_{DPc} , корректирующей форму предельной поверхности:

$$f_{DPt} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_t(R_b, R_{bt}) \cdot \sigma_0 - \sigma_{yt}(R_b, R_{bt}) \leq 0; \quad (10)$$

$$f_{DPc} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_c(R_b, R_{2b}) \cdot \sigma_0 - \sigma_{yc}(R_b, R_{2b}) \cdot \Omega_c \leq 0. \quad (11)$$

Несмотря на введение корректирующей функции, поверхность имеет неудовлетворительное совпадение с опытными данными в меридиональном и девиаторных сечениях (рис. 8, а, с), переоценивая прочность бетона при малых величинах гидростатического обжатия и недооценивая при больших величинах. Наличие аффинного подобия девиаторных сечений, а также отсутствие зависимости поверхности от третьего инварианта девиатора тензора напряжений J_3 также оказывает негативное влияние на совпадение с опытными данными. В сечении $\sigma_1 - \sigma_3$ поверхность совпадает с опытными данными (рис. 8, б).

¹ ANSYS 2023R1 ANSYS Mechanical APDL. Material reference, 2023.

Поверхность имеет сингулярность в вершине в области трехосного растяжения, а также в области перехода между поверхностями f_{DPt} и f_{DPc} (см. рис. 7, б).

3. Критерий Lee – Fenves (R_b, R_{bt}, R_{2b})², который применен в модели бетона конечно-элементного комплекса ABAQUS, описывается уравнением:

$$f_{Lee} = \frac{1}{1 - \alpha(R_b, R_{2b})} \times (\sigma_e - 3 \cdot \alpha(R_b, R_{2b}) \cdot \sigma_0 + \beta(R_b, R_{2b}, R_{bt}) \times \langle \sigma_{\max} \rangle - \gamma \cdot \langle -\sigma_{\max} \rangle) - R_b \leq 0. \quad (12)$$

Поверхность имеет аффинное подобие девиаторных сечений, а также линейную функцию в меридиональном направлении, что приводит к завышению прочности бетона при больших величинах гидростатического обжатия в меридиональном сечении (рис. 8, а). В остальных сечениях поверхность соответствует результатам опытов.

Для описания поверхности применяются скобки Маколея (см. формулу (12)), представляющие собой условие перехода между частями поверхности. Использование условия ведет к образованию ломаной линии в меридиональном сечении, что создает сингулярность в месте перехода (см. рис. 7, с). Кроме того, поверхность имеет точечную сингулярность в области трехосного растяжения, а также сингулярность в виде ребра на меридиане сжатия.

Общий вид поверхностей первой группы представлен на рис. 7. Сравнение поверхностей первой группы с результатами опытов приведено на рис. 8.

Во второй группе рассмотрим следующие критерии:

1. Критерий Л.Ю. Соловьева (R_b, R_{bt}) [37] является составным и описывается уравнениями f_{c1} (13) (основная поверхность) и f_{c2} (14) (шатер сжатия):

² Simulia, Abaqus 2016 analysis user's manual. Providence, RI : Simulia, 2016.

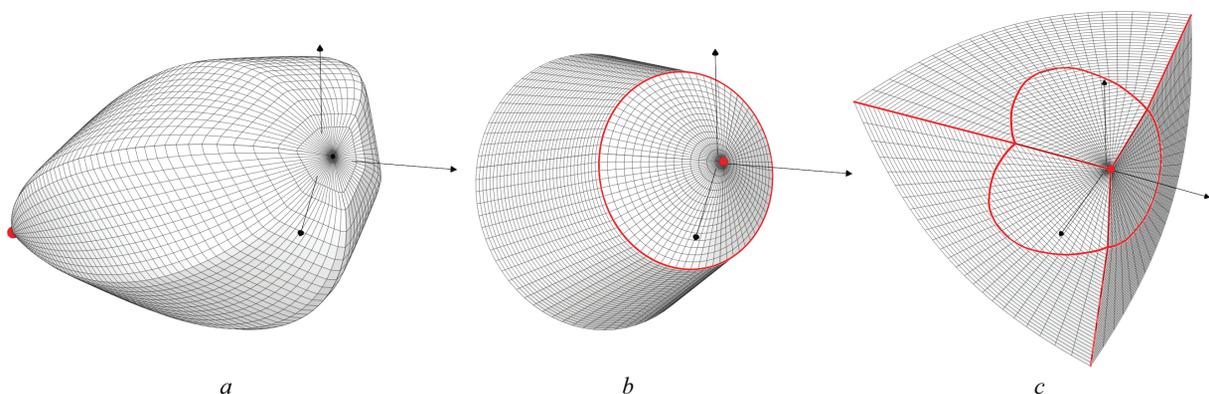


Рис. 7. Предельные поверхности Bigoni – Piccolroaz (а); Drucker – Prager Concrete (б); Lee – Fenves (с) в пространстве главных напряжений

Fig. 7. Bigoni – Piccolroaz (а); Drucker – Prager Concrete (б); Lee – Fenves (с) limit surfaces in principal stress space

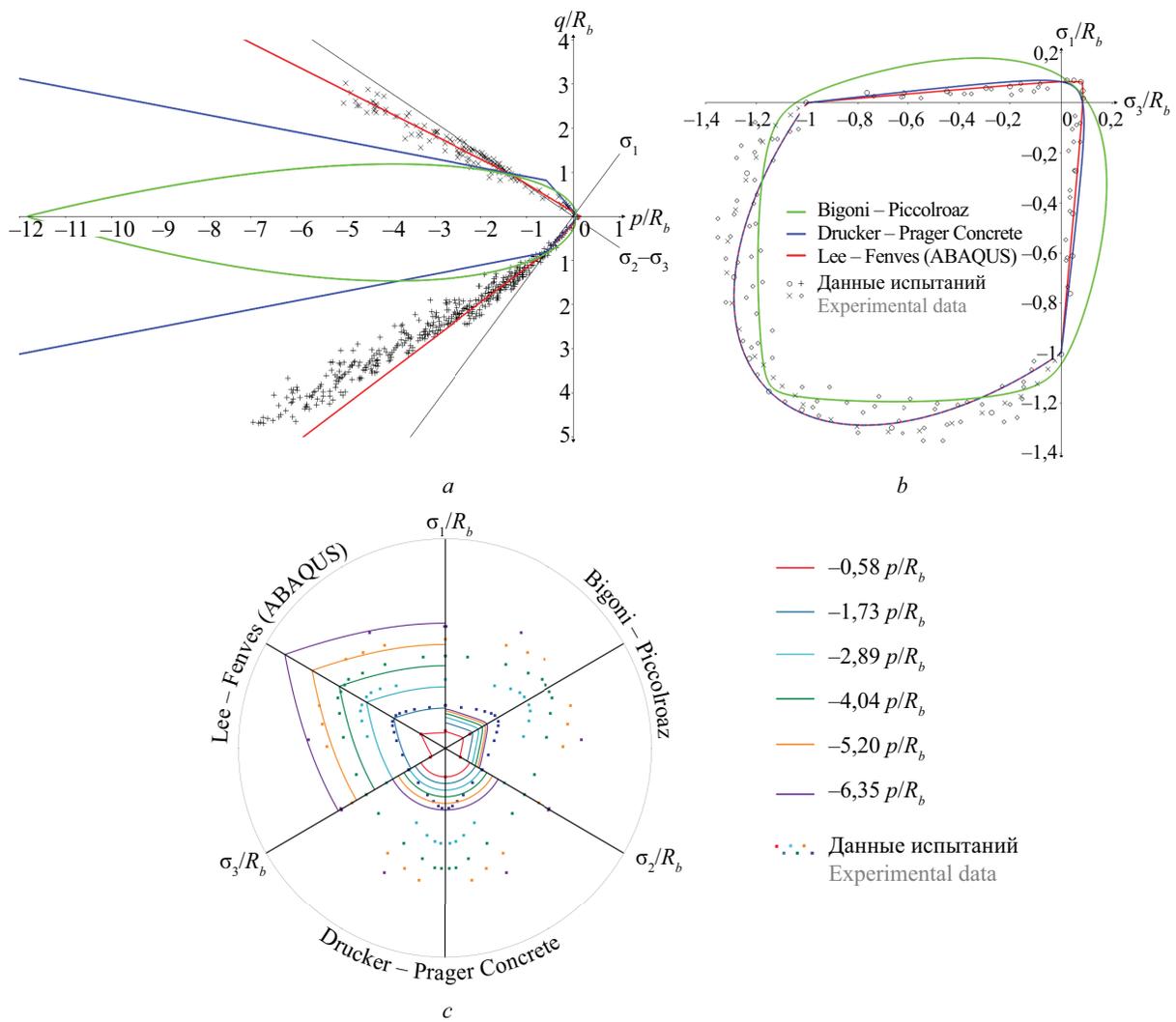


Рис. 8. Сравнение поверхностей первой группы с результатами опытов: меридиональное сечение (а); сечение $\sigma_1-\sigma_3$ (b); девиаторные сечения (с)

Fig. 8. Comparison of the first group with the results of experiments: meridional section (a); section $\sigma_1-\sigma_3$ (b); deviatoric section (c)

$$f_{C1} = \left(\frac{\tau_0}{R_b}\right)^2 + a_1 \cdot \frac{J_3}{R_b^3} + c_1 \leq 0; \quad (13)$$

$$f_{C2} = d_0 \cdot \frac{\tau_0}{R_b} + \frac{\sigma_0}{R_b} - \sigma^* \leq 0. \quad (14)$$

Поверхность недооценивает прочность бетона в девиаторном сечении (рис. 10, с) при величинах гидростатического обжатия $p/R_b < -2$, также завышает прочность бетона в сечении $\sigma_1-\sigma_3$ (рис. 10, b). В меридиональном сечении поверхность в целом соответствует опытным данным (рис. 10, а).

Сингулярные зоны присутствуют в вершинах в областях трехосного сжатия и растяжения, а также в зоне сопряжения частей f_{C1} и f_{C2} (см. рис. 9, а).

Критерий f_{C1} содержит мнимую упругую зону (см. рис. 4), наличие которой обусловлено тем, что для определенных видов напряженного состояния на меридиане сжатия условие $f_{C1} = 0$ выполняется более чем в одной точке. Наличие этой про-

блемы затрудняет использование критерия в рамках численных методов.

2. Пятипараметрический критерий Willam – Warnke ($R_b, R_{bt}, R_{2b}, \rho_1, \xi_1, \rho_2, \xi_2$) [5] описывается уравнением:

$$f_{ww} = \frac{1}{r(\sigma_0, \theta)} \cdot \frac{\tau_a}{R_b} - 1 \leq 0. \quad (15)$$

Для хорошего совпадения с опытными данными на меридиональном и девиаторных сечениях необходим подбор параметров $\rho_1, \xi_1, \rho_2, \xi_2$, значения которых могут быть получены на основании результатов трехосных испытаний бетона. Параметры ρ_1 и ξ_1 представляют собой девиаторную и гидростатическую координаты точки на меридиане сжатия, через которую проходит поверхность; параметры ρ_2 и ξ_2 выполняют аналогичную функцию для меридиана растяжения. Эмпирические зависимости и рекомендации по получению параметров в первоисточнике отсутствуют. Также поверхность завышает прочность бетона в сечении $\sigma_1-\sigma_3$ (рис. 10, b).

Ввиду того, что поверхность строится на основании двух вертикальных парабол, описывающих меридианы сжатия и растяжения, поверхность является замкнутой как в области трехосного растяжения, так и в области трехосного сжатия. Параболы с разными коэффициентами могут иметь пересечение только в одной точке на гидростатической оси. Поэтому для замыкания поверхности в области трехосного сжатия на меридиане растяжения выполнен резкий излом (см. рис. 10, *a*), создающий дополнительную точечную сингулярность и противоречащий требованию постулата Друкера. Кроме того, поверхность имеет сингулярности в вершинах замыкания (см. рис. 9, *b*). Наличие замыкания поверхности в области трехосного сжатия не упоминается авторами и не подразумевается в качестве рабочей области. Таким образом, параметры $\rho_1, \xi_1, \rho_2, \xi_2$ могут быть использованы для отдаления области замыкания от диапазона, в котором происходит работа материала.

3. Составной критерий Willam – Warnke ($R_b, R_{bt}, R_{2b}, f_1, f_2, \sigma_h$)³, использованный для модели бетона Concrete в конечно-элементном комплексе ANSYS, описывается уравнениями (16)–(19):

$$f_{wwA1} = \frac{\tau_a}{R_b} - \frac{2 \cdot r_2 \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot \cos \eta + r_2 \cdot (r_1 \cdot 2 - r_2) \times \sqrt{4 \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot \cos^2 \eta + 5 \cdot r_1^2 - 4 \cdot r_1 \cdot r_2}}{4 \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot \cos^2 \eta + (r_2 - r_1 \cdot 2)^2} \leq 0; \quad (16)$$

³ ANSYS 2023R1 ANSYS Mechanical APDL. Feature Archive, 2023.

$$f_{wwA2} = \frac{\sqrt{(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}{\sqrt{15} \cdot R_b} - \left(1 - \frac{\sigma_1}{R_{bt}}\right) \times \frac{2 \cdot p_2 \cdot (p_2^2 - p_1^2) \cdot \cos \eta + p_2 \cdot (p_1 \cdot 2 - p_2) \times \sqrt{4 \cdot (p_2^2 - p_1^2) \cdot \cos^2 \eta + 5 \cdot p_1^2 - 4 \cdot p_1 \cdot p_2}}{4 \cdot (p_2^2 - p_1^2) \cdot \cos^2 \eta + (p_2 - p_1 \cdot 2)^2} \leq 0; \quad (17)$$

$$f_{wwA3} = \frac{\sigma_{1,2}}{R_b} - \frac{R_{bt}}{R_b} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_3}{R_b}\right) \leq 0; \quad (18)$$

$$f_{wwA4} = \frac{\sigma_{1,2,3}}{R_b} - \frac{R_{bt}}{R_b} \leq 0, \quad (19)$$

где f_{wwA1} — критерий для области «сжатие – сжатие – сжатие»; f_{wwA2} — «сжатие – сжатие – растяжение»; f_{wwA3} — «сжатие – растяжение – растяжение»; f_{wwA4} — «растяжение – растяжение – растяжение».

Для построения составного критерия Willam – Warnke требуются значения одноосного сжатия f_1 и двухосного сжатия f_2 при гидростатическом обжатии σ_h . Другими словами, f_1 и f_2 представляют собой компоненты тензора напряжений при заданном высоком значении гидростатического обжатия. В справке программного комплекса даны эмпирические зависимости для нахождения величин f_1 и f_2 . Однако данные зависимости правомерны только для рабочего диапазона, ограниченного величиной средних напряжений $\sigma_o \leq \sqrt{3} R_b$. Для больших значений средних напряжений подбор параметров необходимо осуществлять на основании опытных данных.

Построенная с помощью рекомендаций из справки ANSYS поверхность изображена на рис. 10. Можно заключить, что поверхность соответствует опытным данным в меридиональном и девиаторных сечениях (рис. 10, *a, b*) при величинах гидростатических обжатий $p/R_b > -2$ и существенно занижает прочность бетона при величинах $p/R_b \leq -2$. Кроме того, поверхность завышает прочность бетона в се-

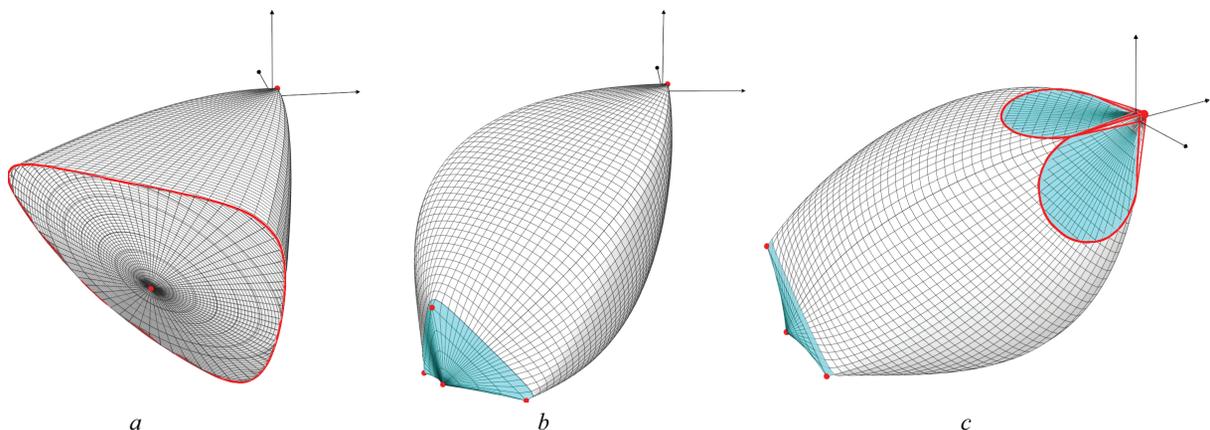


Рис. 9. Предельные поверхности Л.Ю. Соловьева (*a*); Willam – Warnke (*b*); Willam – Warnke ANSYS (*c*) в пространстве главных напряжений

Fig. 9. L.Yu. Solovyov (*a*); Willam – Warnke (*b*); Willam – Warnke ANSYS (*c*) limit surfaces in principal stress space

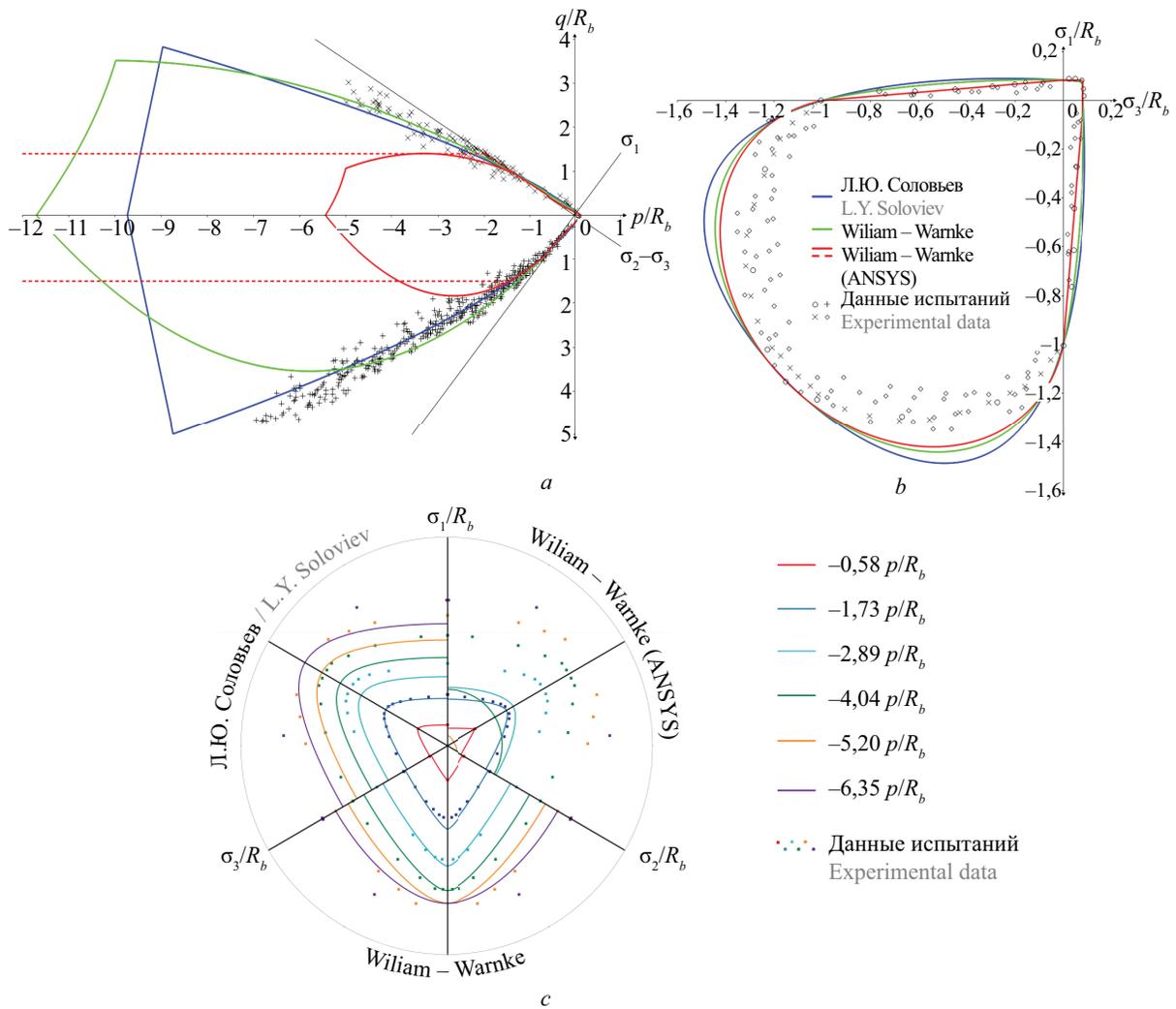


Рис. 10. Сравнение поверхностей второй группы с результатами опытов: меридиональное сечение (а); сечение $\sigma_1 - \sigma_3$ (b); девиаторные сечения (с)

Fig. 10. Comparison of surfaces of the second group with the results of experiments: meridional section (a); section $\sigma_1 - \sigma_3$ (b); deviatoric section (c)

чении $\sigma_1 - \sigma_3$ (рис. 10, b). В ANSYS есть возможность задания минимального количества параметров, ограниченного прочностями на одноосное сжатие R_b и одноосное растяжение R_{bt} . Значения остальных параметров выбираются программой автоматически, согласно рекомендациям [37]. В этом случае вместо шатра сжатия при больших гидростатических обжатиях используется цилиндрическая поверхность Mises, обозначенная пунктирной красной линией на рис. 10, а.

Корректное определение величин f_1 и f_2 позволяет добиться хорошего совпадения с результатами опытов аналогично оригинальному пятипараметрическому критерию Willam – Warnke.

Составная поверхность имеет сингулярные зоны в виде вершин в областях трехосного сжатия, растяжения и ребер поверхностей, описываемых уравнениями (18) и (19). Кроме того, в местах сопряжения частей составной поверхности присутствуют резкие ступенчатые переходы, образующие

зоны сингулярности и нарушения постулата Друкера (рис. 9, с). Часть составного критерия, отвечающая за область «сжатие – сжатие – растяжение» (17) также описывает вогнутую поверхность. Составной критерий разрабатывался для модели Concrete, применяемой в сочетании со специальным конечным элементом Solid65. Модель использует в своей основе теорию упругости и служит критерием хрупкого разрушения при различных видах напряженного состояния. С учетом ряда проблем составной критерий прочности Willam – Warnke не рекомендуется к использованию в рамках численных методов теории пластического течения.

Общий вид поверхностей второй группы представлен на рис. 9. Сравнение поверхностей второй группы с результатами опытов показано на рис. 10.

В третьей группе рассмотрим следующие критерии:

1. Критерий Н.И. Карпенко (R_b, R_{bt}, f, n), описанный в диссертации [38] (формула (20)). Для по-

строения оригинального критерия прочности [39] требуется ряд дополнительных параметров, нахождение которых представляет определенные сложности. Часть параметров не имеет прямого отношения к прочностным параметрам бетона и представляет собой безразмерные величины. Кроме того, для нахождения одного из параметров необходима итеративная процедура. В работе [38] даны рекомендации, позволяющие свести к минимуму количество необходимых параметров, качественно не изменяя поверхность:

$$f_K = a \cdot \sigma_1^2 + b \cdot \sigma_3^2 + \sigma_1 \cdot (k_c \cdot (f - b) + \delta_p) \times \\ \times R_b + \sigma_3 \cdot (k_c \cdot b - f \cdot \delta_p) \cdot R_b - \\ - \sigma_1 \cdot \sigma_3 \cdot (a + b + 1 - f) - k_c \cdot f \cdot \delta_p \cdot R_b^2 \leq 0. \quad (20)$$

Поверхность соответствует опытным данным во всех рассматриваемых сечениях.

Параметр f отвечает за замыкание поверхности в области трехосного сжатия (при $f = 1$ поверхность не замкнута, при $f > 1$ — замкнутая). Предполагается использовать разомкнутую поверхность для плотных бетонов и замкнутую для пористых. Однако при $f > 1$ меридианы сжатия и растяжения не пересекаются на гидростатической оси в одной точке, что приводит к недопустимому искажению поверхности и возникновению сингулярных областей (см. рис. 11).

Как видно на рис. 12, a (построение выполнено при значении $f = 1$), поверхность содержит зоны сингулярности в вершине, в области трехосного растяжения и в ребрах на меридианах сжатия и растяжения. Вне зависимости от значения параметра f на меридиане сжатия при больших величинах гидростатического обжатия присутствует вогнутая область, не удовлетворяющая требованиям постулата Друкера, что препятствует использованию критерия в рамках численных методов теории пластического течения.

В области трехосного растяжения при определенных соотношениях R_b и R_{bt} , реалистичных

для бетона, возникает проблема, аналогичная проблеме с замыканием в области трехосного сжатия, описанная выше (см. рис. 11).

2. Составной критерий Н.И. Карпенко ($R_b, R_{bt}, a_1, b, c_1, d, e, f, a_2, c_2, p$) [40] описывается уравнениями (21)–(24):

$$f_{KC1} = -k_c \cdot R_b + \beta_{II} \cdot \sigma_1 - \sigma_3 \leq 0; \quad (21)$$

$$f_{KC2} = \left(\frac{\sigma_1}{R_{bt}} \right)^2 - 2 \cdot a_2 \cdot \frac{\sigma_1}{R_{bt}} \cdot \frac{\sigma_2}{k_c \cdot R_b} + \\ + \left(\frac{(2 \cdot c_2 - 1) \cdot \sigma_3}{k_c \cdot R_b + 2 \cdot c_2 \cdot \sigma_3} \right)^p - 1 \leq 0; \quad (22)$$

$$f_{KC3} = \left(\frac{\sigma_1}{R_{bt}} \right)^2 + a_2 \cdot \left(\frac{\sigma_2}{R_{bt}} \right)^2 + \\ + \left(\frac{(2 \cdot c_2 - 1) \cdot \sigma_3}{R_b + 2 \cdot c_2 \cdot \sigma_3} \right)^p - 1 \leq 0; \quad (23)$$

$$f_{KC4} = \left(\frac{\sigma_1}{R_{bt}} \right)^2 + a_2 \cdot \left(\left(\frac{\sigma_2}{R_{bt}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{R_{bt}} \right)^2 \right) - 1 \leq 0, \quad (24)$$

где f_{KC1} — критерий для области «сжатие – сжатие – сжатие»; f_{KC2} — «сжатие – сжатие – растяжение»; f_{KC3} — «сжатие – растяжение – растяжение»; f_{KC4} — «растяжение – растяжение – растяжение».

Согласно результатам сравнения имеет место занижение прочности бетона при величинах гидростатического обжатия $p/R_b < -2$ в девятиорных сечениях (рис. 13, c). В остальных сечениях поверхность соответствует результатам опытов.

Для использования составного критерия необходим набор из 11 параметров, позволяющих осуществлять гибкую настройку формы поверхности. Основной проблемой является то, что большая часть набора представляет собой безразмерные величины, физический смысл которых не объяснен

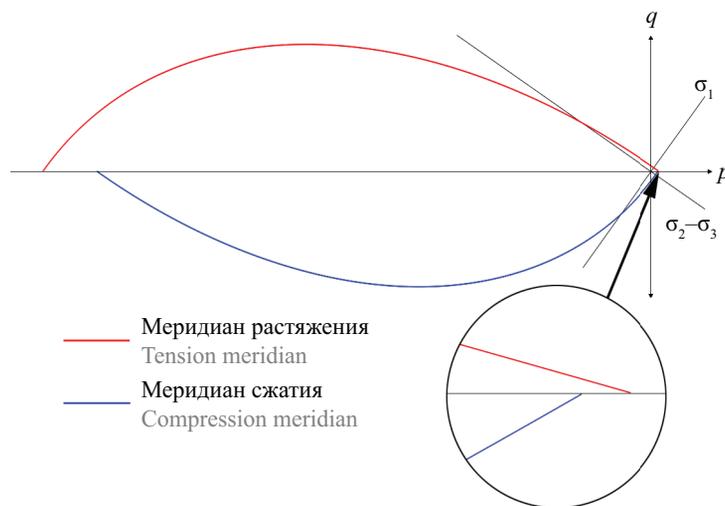


Рис. 11. Демонстрация проблемы замыкания поверхности Н.И. Карпенко в областях трехосного сжатия и растяжения

Fig. 11. Visualization of N.I. Karpenko surface closure problem in triaxial-compression and tension regions

авторами. Данное обстоятельство усложняет процедуру подбора параметров и препятствует гибкой настройке поверхности, вынуждая пользователя применять представленные в первоисточнике значения, рекомендованные для тяжелого бетона.

В местах сопряжения частей составной поверхности присутствуют резкие переходы, образующие зоны сингулярности (см. рис. 12, *b*). Кроме того, присутствуют сингулярности в виде ребер на меридианах сжатия и растяжения, в вершине в области трехосного растяжения, а также сингулярности разного характера в области трехосного сжатия, образующиеся при использовании значения параметра $f > 1$ (по аналогии с описанной ранее поверхностью Н.И. Карпенко, см. рис. 11).

Поверхность не удовлетворяет требованиям постулата Друкера в месте перехода между частями поверхности (см. рис. 12, *b*), которые описываются уравнениями (21) и (22), а также на меридиане сжатия, образуя вогнутость.

Части составного критерия (21)–(24) должны использоваться строго в областях пространства главных напряжений, указанных авторами, так как имеют мнимые упругие области за пределами границ применимости.

Для составных критериев в схеме «упругий предиктор – пластический корректор» начальный и конечный тензоры напряжений могут соответствовать разным частям составного критерия, что не является допустимым в рамках численных методов теории пластического течения. Данное обстоятельство накладывает ограничения на использование составных критериев Н.И. Карпенко и Willam – Warnke в численных методах.

3. Критерий С.Ф. Клованича – Д.И. Безушко ($R_b, R_{bt}, R_{2t}, R_{2c}$) [41] описывается уравнениями:

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \frac{2 \cdot a(\tau_1, \tau_2) \cdot \cos(\theta) + b(\tau_1, \tau_2) \times \sqrt{a(\tau_1, \tau_2) \cdot (4 \cdot \cos^2(\theta) - 1) + b(\tau_1, \tau_2)^2}}{4 \cdot a(\tau_1, \tau_2) \cdot \cos^2(\theta) + b(\tau_1, \tau_2)^2}; \quad (25)$$

$$\tau_{1(2)} = -\frac{B_{1(2)} + \sqrt{B_{1(2)}^2 + 4 \cdot A_{1(2)} \cdot (\sigma_0 - C)}}{2 \cdot A_{1(2)}}. \quad (26)$$

Поверхность завышает прочность бетона в сечении $\sigma_1 - \sigma_3$ (рис. 13, *b*) и занижает прочность бетона при величинах гидростатического обжатия $p/R_b < -2$ в меридиональном и девиаторных сечениях (рис. 13, *a, b*).

В критерии присутствует единственная зона сингулярности в вершине в области трехосного растяжения (рис. 12, *c*).

Общий вид поверхностей третьей группы представлен на рис. 12. Сравнение поверхностей третьей группы с результатами опытов показано на рис. 13.

В заключительной, четвертой группе, рассмотрим следующие критерии:

1. Критерий Ottosen ($R_b, R_{bt}, R_{2c}, \sigma_{com}, \tau_{com}$) [42] описывается уравнением:

$$f_o = A \cdot \frac{J_2}{R_b^2} + \lambda(\theta) \cdot \frac{\sqrt{J_2}}{R_b} + B \cdot \frac{I_1}{R_b} - 1. \quad (27)$$

Для своего построения критерий требует параметры σ_{com}, τ_{com} , представляющие собой гидростатическую и девиаторную координаты точки на меридиане сжатия при больших величинах гидростатического обжатия. В труде [43] представлены эмпирические значения, позволяющие вычислить данные величины. Однако поверхность, построенная с использованием рекомендованных значений, завышает прочность бетона в меридиональном и девиаторных сечениях (см. рис. 15, *a, c*) и в области двухосного сжатия в сечении $\sigma_1 - \sigma_3$ (рис. 15, *b*). Таким образом, для достижения наи-

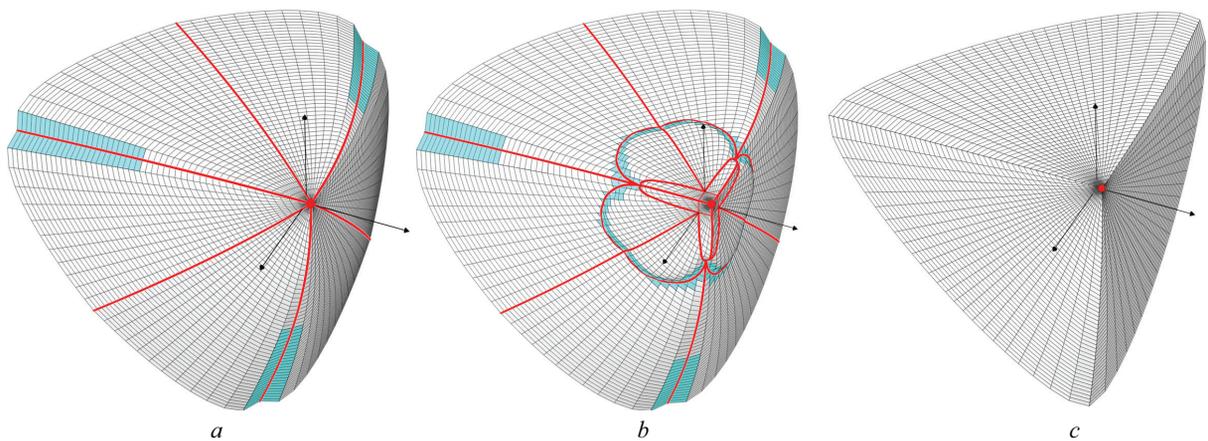


Рис. 12. Поверхность Н.И. Карпенко (*a*); составная поверхность Н.И. Карпенко (*b*); поверхность С.Ф. Клованича – Д.И. Безушко (*c*) в пространстве главных напряжений

Fig. 12. Surface of N.I. Karpenko (*a*); composite surface of N.I. Karpenko (*b*); surface of Klovaniich – Bezushko (*c*) in principal stress space

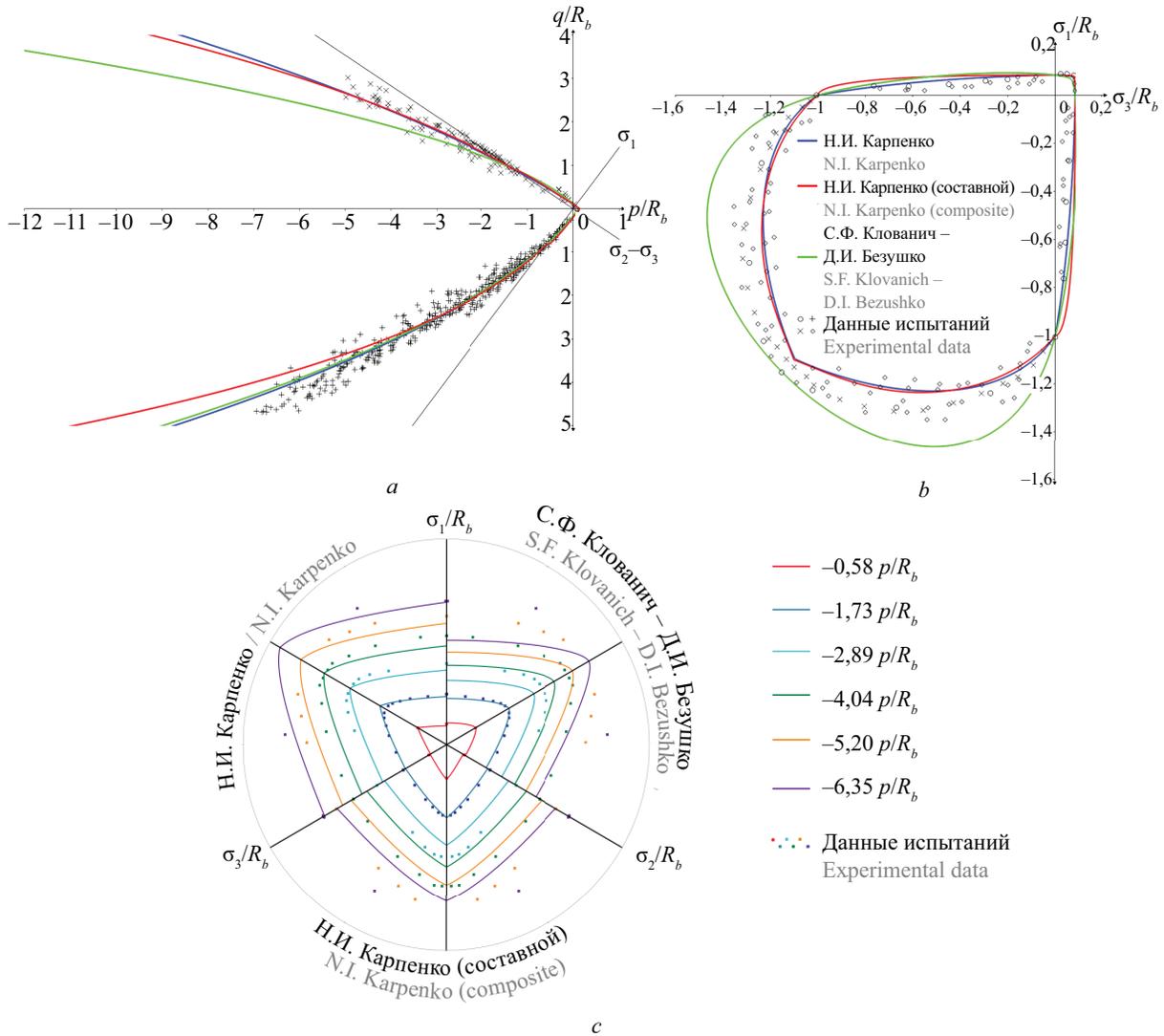


Рис. 13. Сравнение поверхностей третьей группы с результатами опытов: меридиональное сечение (а); сечение $\sigma_1-\sigma_3$ (b); девиаторные сечения (с)

Fig. 13. Comparison of the surfaces of the third group with the results of experiments: meridional section (a); section $\sigma_1-\sigma_3$ (b); deviatoric section (c)

лучшего соответствия опытным данным параметры должны определяться на основании трехосных испытаний бетона.

Критерий имеет единственную зону сингулярности в вершине в области трехосного растяжения (рис. 14, а).

2. Критерии Menetrey – Willam (R_b, R_{bt}, R_{2c}) [44], Grassl (R_b, R_{bt}, R_{2c}) [45], а также критерий, представленный в работе А.М. Бударина ($R_b, R_{bt}, R_{2c}, R_{3b}, R_{vh}$) [46], описываются уравнениями (28)–(30) соответственно:

$$f_{MW} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{q}{R_b} \right)^2 + m_0 \times \left(\frac{q}{R_b \cdot \sqrt{6}} \cdot r(\theta, e) + \frac{p}{R_b \cdot \sqrt{3}} \right) - 1; \quad (28)$$

$$f_G = \left((1 - c_h) \cdot \left(\frac{q}{R_b \cdot \sqrt{6}} + \frac{\sigma_0}{R_b} \right) + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{q}{R_b} \right)^2 + m_0 \cdot c_h^2 \cdot \left(\frac{q}{R_b \cdot \sqrt{6}} \cdot r(\theta, e) + \frac{\sigma_0}{R_b} \right) - c_h^2; \quad (29)$$

$$f_B = \left(\left(\frac{q}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + c_h \cdot m_0 \cdot \frac{q}{\sqrt{6} \cdot R_b} \cdot r(e, \theta) \right)^2 - f_{comp}(p) \cdot \left(c_h - c_h \cdot m_0 \cdot \frac{p}{\sqrt{3} \cdot R_b} \right)^2. \quad (30)$$

Уравнения (29) и (30) представляют собой модификации уравнения (28), описывающие поверхность, замкнутую в области трехосного сжатия. Модификация имеет цель отразить пластическую сжимаемость бетона (контракцию). В поверхности

Grassl реализован совместный механизм девиаторной эволюции и эволюции шатра сжатия (шатер сжатия присутствует только на стадии эволюции поверхности при $c_h < 1$). Таким образом, критерии прочности (при $c_h = 1$), описываемые уравнениями (28) и (29), совпадают. Концепция, реализованная в работе А.М. Бударина, подразумевает отдельные механизмы девиаторной эволюции и эволюции шатра сжатия, что требует использования двух дополнительных параметров (R_{3b} — координата замыкания поверхности на гидростатической оси в области трехосного сжатия; R_{vh} — безразмерный множитель к R_{3b} , определяющий начало шатра сжатия), формулы для вычисления которых представлены в первоисточнике. Поверхности соответствуют результатам опытов во всех рассматриваемых сечениях.

Упомянутые выше критерии имеют зону сингулярности в вершине, в области трехосного растяжения (рис. 14, *b–d*). Кроме того, критерий Grassl имеет сингулярность в вершине (рис. 14, *c*) в обла-

сти трехосного сжатия при $c_h < 1$ (до достижения поверхности прочности).

3. Критерий Hseih – Ting – Chen ($R_b, R_{bt}, R_{2c}, \sigma_{com}, \tau_{com}$) [47] описывается уравнением:

$$f_{HTC} = a \cdot \frac{J_2}{R_b^2} + b \cdot \frac{\sqrt{J_2}}{R_b} + c \cdot \frac{\sigma_1}{R_b} + d \cdot \frac{I_1}{R_b} - 1. \quad (31)$$

Для использования критерия необходимо выполнить подбор коэффициентов a, b, c, d , значения которых могут быть получены путем совместного решения системы линейных алгебраических уравнений. Система составляется исходя из условия прохождения поверхности через ряд характерных точек в пространстве главных напряжений, представляющих собой прочности при одноосном сжатии, одноосном растяжении, двухосном равномерном сжатии и трехосном неравномерном сжатии. Коэффициенты зависят от соотношения упомянутых выше прочностных параметров и имеют разные значения в зависимости от класса бетона. Необходимость вы-

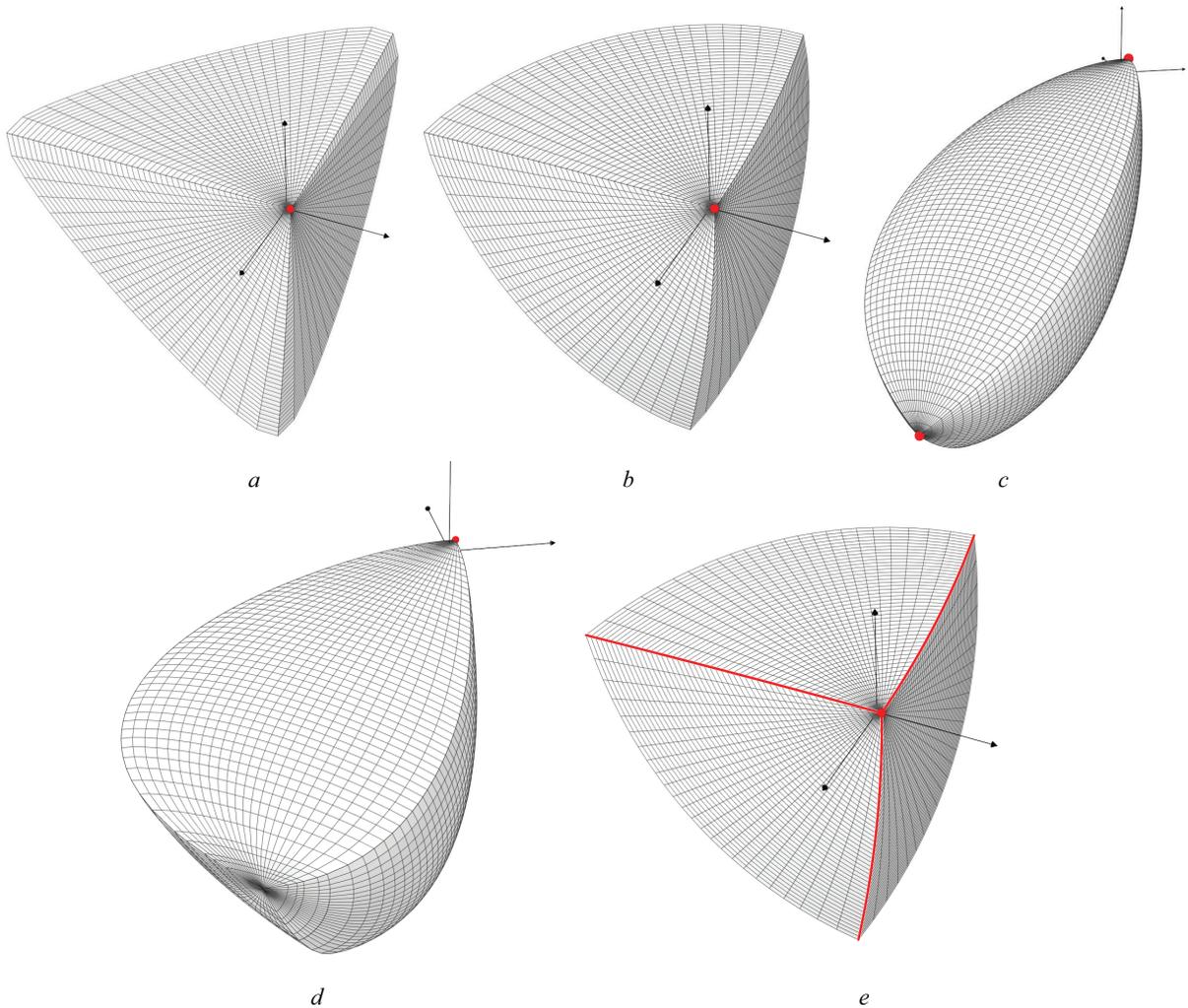


Рис. 14. Поверхности Ottosen (*a*); Menetrey – Willam (*b*); Grassl (*c*); А.М. Бударина (*d*); Hseih – Ting – Chen (*e*) в пространстве главных напряжений

Fig. 14. Ottosen (*a*); Menetrey – Willam (*b*); Grassl (*c*); A.M. Budarin (*d*), Hseih – Ting – Chen (*e*) surfaces in principal stress space

Табл. 2. Результаты сравнительного анализа рассмотренных критериев прочности бетона

Table 2. Results of a comparative analysis of the considered concrete strength criteria

Критерий / Criterion	Соответствие результатам опытов Consistency with the results of experiments	Количество зон сингулярности Number of singularity zones	Отсутствие мнимых упругих областей Absence of false elastic regions	Выпуклость поверхности Convexity of the surface	Легкость определения параметров Easy to define parameters
Bigoni – Piccolroaz	Неудовлетворительно Unsatisfactory	1	+	+	–
Drucker – Prager Concrete	Удовлетворительно Satisfactory	2	+	+	+
Lee – Fenves (ABAQUS)	Хорошо Good	>2	+	+	+
Л.Ю. Соловьев L.Y. Soloviev	Удовлетворительно Satisfactory	>2	–	+	+
Willam – Warnke	Хорошо* Good*	1**	+	+**	–
(Составной / Composite) Willam – Warnke (ANSYS)	Хорошо* Good*	>2	+	–	–
Н.И. Карпенко N.I. Karpenko	Отлично Excellent	>2	+	–	+
(Составной) Н.И. Карпенко (Composite) N.I. Karpenko	Хорошо Good*	>2	+***	–	+****
С.Ф. Клованич – Д.И. Безушко S.F. Klovanych – D.I. Bezushko	Удовлетворительно Satisfactory	1	+	+	+
Ottosen	Отлично* Excellent*	1	+	+	–
Menetrey – Willam	Отлично Excellent	1	+	+	+
Grassl	Отлично Excellent	1*****	+	+	+
А.М. Бударин / A.M. Budarin	Отлично Excellent	1	+	+	+
Hseih – Ting – Chen	Хорошо* Good*	2	+	+	–

Примечание: * — для соответствия поверхности опытным данным необходимы результаты испытаний бетона на трехосное неравномерное сжатие; ** — критерий имеет единственную зону сингулярности и не нарушает требования постулата Друкера при условии использования поверхности в рабочем диапазоне, не достигающем до начала замыкания в области трехосного сжатия; *** — мнимые упругие зоны отсутствуют при использовании частей составного критерия прочности строго в рамках областей пространства главных напряжений, заявленных авторами; **** — необходимость определения значений дополнительных параметров отсутствует при условии применения набора параметров, рекомендованного авторами для тяжелого бетона; ***** — критерий прочности имеет единственную сингулярность. При упрочнении поверхность имеет дополнительную сингулярность в области трехосного сжатия.

Note: * — the results of concrete tests for triaxial non-uniform compression are required to match the surface with the experimental data; ** — the criterion has a single zone of singularity and does not violate the requirements of Drucker's postulate provided that the surface is used in the operating range that does not reach the beginning of closure in the region of triaxial compression; *** — false elastic regions are absent when using parts of the composite strength criterion strictly within the regions of the principal stress space declared by the authors; **** — there is no need to determine the values of additional parameters if the set of parameters recommended by the authors for normal concrete is used; ***** — the strength criterion has a single singularity. In case of hardening, the surface has an additional singularity in the triaxial compression region.

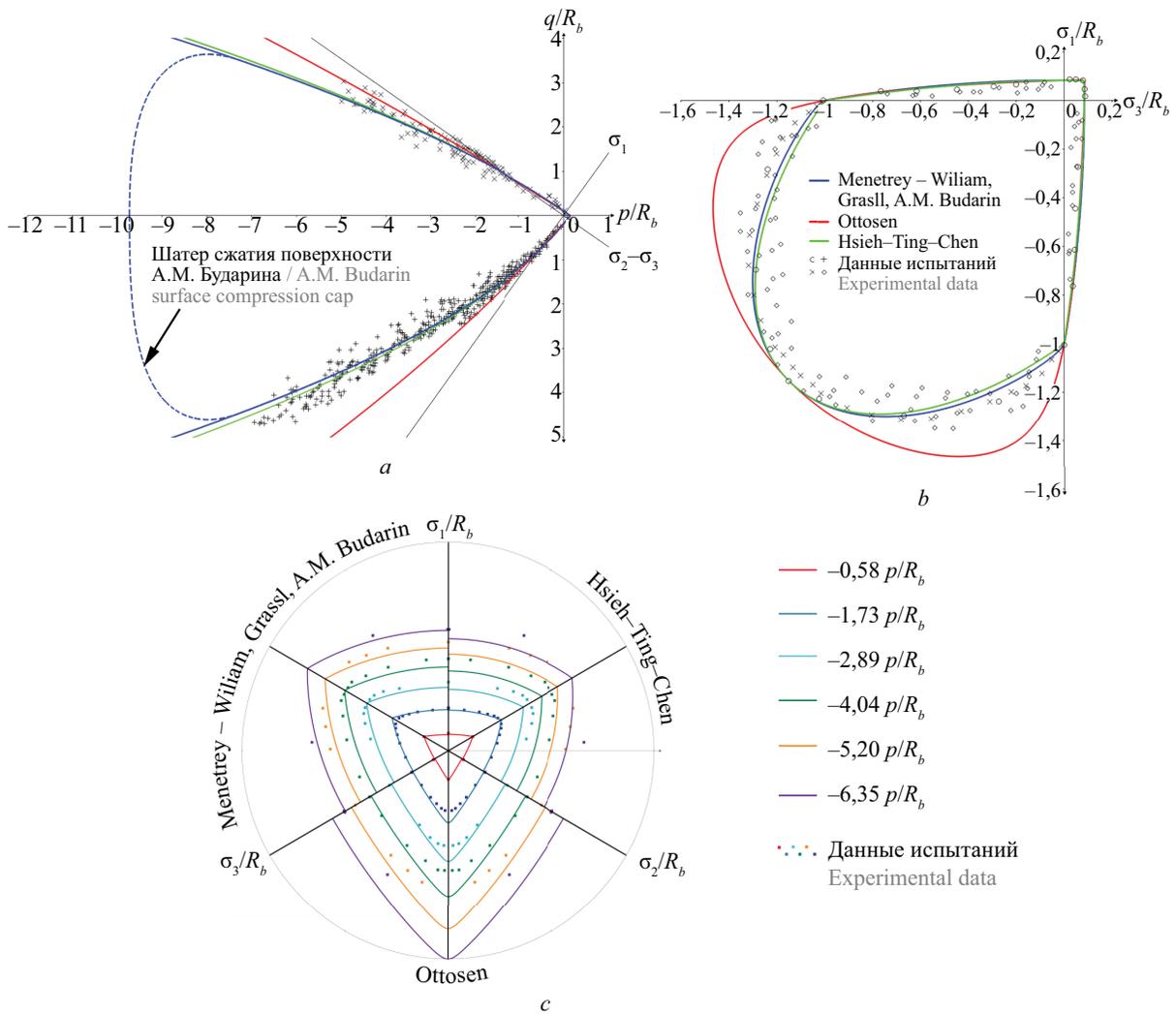


Рис. 15. Сравнение поверхностей четвертой группы с результатами опытов: меридиональное сечение (а); сечение $\sigma_1-\sigma_3$ (b); девиаторные сечения (с)

Fig. 15. Comparison of the surfaces of the fourth group with the results of experiments: meridional section (a); section $\sigma_1-\sigma_3$ (b); deviatoric section (c)

полнения процедуры подбора коэффициентов усложняет использование критерия.

Поверхность совпадает с опытными данными во всех рассматриваемых сечениях, кроме девиаторных (рис. 15, с), при величине гидростатического обжатия $p/R_b < -2$.

Критерий содержит зону сингулярности в вершине в области трехосного растяжения, а также сингулярность в виде ребра на меридиане сжатия (рис. 14, е).

Общий вид поверхностей четвертой группы представлен на рис. 14. Сравнение поверхностей четвертой группы с результатами опытов приведено на рис. 15.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения уровня соответствия опытными данным использована следующая оценочная шкала: отлично (поверхность соответствует ре-

зультатам опытов во всех рассмотренных сечениях, см. рис. 6), хорошо (присутствует отклонение в одном из сечений: меридиональном, девиаторных или сечении $\sigma_1-\sigma_3$), удовлетворительно (отклонение в двух сечениях), неудовлетворительно (отклонение во всех трех сечениях).

Результаты сравнительного анализа рассмотренных критериев прочности бетона представлены в табл. 2.

Из всех рассмотренных в статье критериев прочности бетона критерий Menetrey – Willam, а также его модификации (Grassl, А.М. Бударин) наилучшим образом совпадают с опытными данными и обладают удобным набором параметров, не требующим дополнительных процедур подбора. Поверхности имеют минимальное количество зон сингулярности, а также отсутствие мнимых упругих областей, что позволяет выполнить уникальное и стабильное численное решение в рамках различных численных методов, включая теорию пластического течения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Staber B., Forest S., Kotob M., Mazière M., Rose T.* Loss of ellipticity analysis in non-smooth plasticity // *International Journal of Solids and Structures*. 2021. Vol. 222–223. P. 111010. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.02.021
2. *Корсун В.И., Карпенко С.Н., Макаренко С.Ю., Недорезов А.В.* Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 5 (97). С. 16–30. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30. EDN HYNCLS.
3. *Chen W.F.* Plasticity in Reinforced Concrete. New York : J. Ross Publishing Classics, 2007. 474 p.
4. *Jirásek M., Bažant Z.P.* Inelastic Analysis of Structures. Chichester : Wiley, 2002. 722 p.
5. *Willam K.J., Warnke E.P.* Constitutive model for the triaxial behavior of concrete // *IABSE*. 1974. Pp. 1–31.
6. *Lim J.C., Ozbakkaloglu T., Gholampour A., Bennett T., Sadeghi R.* Finite-element modeling of actively confined normal-strength and high-strength concrete under uniaxial, biaxial, and triaxial compression // *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. Issue 11. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001589
7. *Ansari F., Li Q.B.* High-strength concrete subjected to triaxial compression // *ACI Materials Journal*. 1998. Vol. 95. Issue 6. DOI: 10.14359/420
8. *Bellamy C.J.* Strength of concrete under combined stress // *ACI Journal Proceedings*. 1961. Vol. 58. Issue 10. DOI: 10.14359/7989
9. *Bellotti R., Ronzoni E.* Results of tests carried out on cylindrical concrete specimens subjected to complex stress states : a critical analysis // *Proceedings of International Conference on Concrete under Multiaxial Condition*. 1984.
10. *Bellotti R., Rossi P.* Cylinder tests: Experimental technique and results // *Materials and Structures*. 1991. Vol. 24. Issue 1. Pp. 45–51. DOI: 10.1007/bf02472681
11. *Candappa D.C., Sanjayan J.G., Setunge S.* Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2001. Vol. 13. Issue 3. Pp. 209–215. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2001)13:3(209)
12. *Candappa D.P., Setunge S., Sanjayan J.G.* Stress versus strain relationship of high strength concrete under high lateral confinement // *Cement and Concrete Research*. 1999. Vol. 29. Issue 12. Pp. 1977–1982. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00219-7
13. *Chern J.C., Yang H.J., Chen H.W.* Behavior of steel fiber reinforced concrete in multiaxial loading // *ACI Materials Journal*. 1993. Vol. 89. Issue 1. DOI: 10.14359/1242
14. *Cordon W.A., Gillespie H.A.* Variables in concrete aggregates and portland cement paste which influence the strength of concrete // *ACI Journal Proceedings*. 1963. Vol. 60. Issue 8. DOI: 10.14359/7889
15. *Duke C.M., Davis H.E.* Some properties of concrete under sustained combined stresses // *Proceedings-American society for testing and materials*. 1944. Vol. 44. Pp. 888–896.
16. *Farnam Y., Moosavi M., Shekarchi M., Babanajad S.K., Bagherzadeh A.* Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression // *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40. Issue 11. Pp. 1571–1581. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.009
17. *Gabet T., Malecot Y., Daudeville L.* Triaxial behaviour of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states // *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. Issue 3. Pp. 403–412. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.029
18. *Imran I., Pantazopoulou S.J.* Experimental study of plain concrete under triaxial stress // *ACI Materials Journal*. 1996. Vol. 93. Issue 6. DOI: 10.14359/9865
19. *Kotsovos M.D.* Effect of stress path on the behavior of concrete under triaxial stress states // *ACI Journal Proceedings*. 1979. Vol. 76. Issue 2. DOI: 10.14359/6944
20. *Wang C.Z., Guo Z.H., Zhang X.Q.* Experimental investigation of biaxial and triaxial compressive concrete strength // *ACI Materials Journal*. 1987. Vol. 84. Issue 2. DOI: 10.14359/1808
21. *Launay P., Gachon H.* Strain and ultimate strength of concrete under triaxial stress // *ACI Materials Journal*. 1972. Pp. 23–34.
22. *Sfer D., Carol I., Gettu R., Etse G.* Study of the behavior of concrete under triaxial compression // *Journal of Engineering Mechanics*. 2002. Vol. 128. Issue 2. Pp. 156–163. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2002)128:2(156)
23. *Smith S.S., Willam K.J., Gerstle K.H., Sture S.* Concrete over the top – or, is there life after peak? // *ACI Materials Journal*. 1989. Vol. 86. Issue 5. DOI: 10.14359/2089
24. *Kupfer H., Gerstle K.H.* Behavior of concrete under biaxial stresses // *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1969. Vol. 99. Issue 4. Pp. 853–866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789
25. *Nelissen L.* Biaxial testing of normal concrete // *Heron*. 1972. Vol. 18. Issue 1. Pp. 1–90.
26. *Van Mier J.G.M.* Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions : Ph.D. Thesis. Eindhoven : Technische Hogeschool Eindhoven, 1984.
27. *Mises R.V.* Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand // *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen (Mathematisch-physikalische Klasse)*. 1913. Vol. 1. Pp. 582–592.

28. Rankine W. On the stability of loose earth // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1857. Vol. 147. Pp. 9–27. DOI: 10.1098/rstl.1857.0003
29. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М. : Стройиздат, 1974. 316 с. EDN RSNPAX.
30. Аликова Н.М., Гениев Г.А. Вариант условия прочности бетона // Теоретические исследования в области строительной механики пространственных систем. 1976. С. 21–27.
31. Лейтес Е.С. К уточнению одного из условий прочности бетона // Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности : сб. науч. тр. НИИЖБ, 1980. С. 37–40.
32. Яшин А.В. Критерии прочности и деформирования бетона при простом нагружении для различных видов напряженного состояния // Расчет и конструирование железобетонных конструкций. 1977. С. 48–57.
33. Bresler B., Pister K.S. Strength of concrete under combined stresses // ACI Journal Proceedings. 1958. Vol. 55. Issue 9. DOI: 10.14359/11358
34. Leon A. Über die Scherfestigkeit des Betons // Beton und Eisen. 1935. Vol. 34. Pp. 130–135.
35. Bigoni D., Piccolroaz A. Yield criteria for quasi-brittle and frictional materials // International Journal of Solids and Structures. 2004. Vol. 41. Issue 11–12. Pp. 2855–2878. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.12.024
36. Poltronieri F., Piccolroaz A., Bigoni D., Romero Baivier S. A simple and robust elastoplastic constitutive model for concrete // Engineering Structures. 2014. Vol. 60. Pp. 81–84. DOI: 10.1016/j.engstr.2013.12.007
37. Соловьев Л.Ю. Нелинейная модель бетона на основе теории пластического течения // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 131–140. EDN TFBEMN.
38. Петров А.Н. Деформационная модель ползучести железобетона и ее приложение к расчету плосконапряженных элементов и систем из них : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 326 с.
39. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.
40. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. Составной критерий прочности бетона при объемном напряженном состоянии // Бетон и железобетон — взгляд в будущее : науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону. 2014. С. 156–165. EDN TRROFR.
41. Клованич С.Ф., Безушко Д.И. Численный эксперимент по исследованию деформационных теорий пластичности бетона // Вестник ОГАСА. 2006. № 22. С. 122–130.
42. Ottosen N.S. A failure criterion for concrete // Journal of the Engineering Mechanics Division. 1977. Vol. 103. Issue 4. Pp. 527–535. DOI: 10.1061/jmcea3.0002248
43. Beverly P. FIB model code for concrete structures 2010. 2013.
44. Menetrey P., Willam K.J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization // ACI Structural Journal. 1995. Vol. 92. Issue 3. DOI: 10.14359/1132
45. Grassl P., Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure // International Journal of Solids and Structures. 2006. Vol. 43. Issue 22–23. Pp. 7166–7196. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032
46. Бударин А.М., Ремпель Г.И., Камзолкин А.А., Алехин В.Н. Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 4. С. 517–532. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532
47. Hsieh S.S., Ting E.C., Chen W.F. A plastic-fracture model for concrete // International Journal of Solids and Structures. 1982. Vol. 18. Issue 3. Pp. 181–197. DOI: 10.1016/0020-7683(82)90001-4

Поступила в редакцию 11 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 8 апреля 2024 г.

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

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

Андрей Петрович Долгих — начальник отдела расчетных обоснований; **АО «Институт Гидропроект»**; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; a.dolgih@hydroproject.ru;

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

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

Вклад авторов:

Ремпель Г.И. — концепция исследования, сбор материала и обработка данных, научное редактирование, создание графических материалов.

Бударин А.М. — концепция исследования, сбор материала и обработка данных, научное редактирование.
Долгих А.П. — научное редактирование.
Камзолкин А.А. — научное редактирование, создание графических материалов.
Алехин В.Н. — научное редактирование.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Staber B., Forest S., Kotob M., Mazière M., Rose T. Loss of ellipticity analysis in non-smooth plasticity. *International Journal of Solids and Structures*. 2021; 222-223:111010. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.02.021
2. Korsun V.I., Karpenko S.N., Makarenko S.Yu., Nedoresov A.V. Modern strength criteria for concrete under triaxial stress states. *Building and Reconstruction*. 2021; 5(97):16-30. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30. EDN HYNCLS. (rus.)
3. Chen W.F. *Plasticity in Reinforced Concrete*. New York, J. Ross Publishing Classics, 2007; 474.
4. Jirásek M., Bažant Z.P. *Inelastic Analysis of Structures*. Chichester, Wiley, 2002; 722.
5. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. *IABSE*. 1974; 1-31.
6. Lim J.C., Ozbakkaloglu T., Gholampour A., Bennett T., Sadeghi R. Finite-Element Modeling of Actively Confined Normal-Strength and High-Strength Concrete under Uniaxial, Biaxial, and Triaxial Compression. *Journal of Structural Engineering*. 2016; 142(11). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001589
7. Ansari F., Li Q.B. High-strength concrete subjected to triaxial compression. *ACI Materials Journal*. 1998; 95(6). DOI: 10.14359/420
8. Bellamy C.J. Strength of concrete under combined stress. *ACI Journal Proceedings*. 1961; 58(10). DOI: 10.14359/7989
9. Bellotti R., Ronzoni E. Results of tests carried out on cylindrical concrete specimens subjected to complex stress states : a critical analysis. *Proceedings of International Conference on Concrete under Multiaxial Condition*. 1984.
10. Bellotti R., Rossi P. Cylinder tests: Experimental technique and results. *Materials and Structures*. 1991; 24(1):45-51. DOI: 10.1007/bf02472681
11. Candappa D.C., Sanjayan J.G., Setunge S. Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2001; 13(3): 209-215. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2001)13:3(209)
12. Candappa D.P., Setunge S., Sanjayan J.G. Stress versus strain relationship of high strength concrete under high lateral confinement. *Cement and Concrete Research*. 1999; 29(12):1977-1982. DOI: 10.1016/s0008-8846(99)00219-7
13. Chern J.C., Yang H.J., Chen H.W. Behavior of steel fiber reinforced concrete in multiaxial loading. *ACI Materials Journal*. 1993; 89(1). DOI: 10.14359/1242
14. Cordon W.A., Gillespie H.A. Variables in concrete aggregates and portland cement paste which influence the strength of concrete. *ACI Journal Proceedings*. 1963; 60(8). DOI: 10.14359/7889
15. Duke C.M., Davis H.E. Some properties of concrete under sustained combined stresses. *Proceedings-American society for testing and materials*. 1944; 44:888-896.
16. Farnam Y., Moosavi M., Shekarchi M., Babanajad S.K., Bagherzadeh A. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression. *Cement and Concrete Research*. 2010; 40(11):1571-1581. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.06.009
17. Gabet T., Malecot Y., Daudeville L. Triaxial behaviour of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states. *Cement and Concrete Research*. 2008; 38(3):403-412. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.029
18. Imran I., Pantazopoulou S.J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress. *ACI Materials Journal*. 1996; 93(6). DOI: 10.14359/9865
19. Kotsovos M.D. Effect of stress path on the behavior of concrete under triaxial stress states. *ACI Journal Proceedings*. 1979; 76(2). DOI: 10.14359/6944.
20. Wang C.Z., Guo Z.H., Zhang X.Q. Experimental investigation of biaxial and triaxial compressive concrete strength. *ACI Materials Journal*. 1987; 84(2). DOI: 10.14359/1808.
21. Launay P., Gachon H. Strain and ultimate strength of concrete under triaxial stress. *ACI Materials Journal*. 1972; 23-34.
22. Sfer D., Carol I., Gettu R., Etse G. Study of the behavior of concrete under triaxial compression. *Journal of Engineering Mechanics*. 2002; 128(2):156-163. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2002)128:2(156)
23. Smith S.S., Willam K.J., Gerstle K.H., Sture S. Concrete over the top – or, is there life after peak? *ACI Materials Journal*. 1989; 86(5). DOI: 10.14359/2089.
24. Kupfer H., Gerstle K.H. Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1969; 99(4):853-866. DOI: 10.1061/jmcea3.0001789
25. Nelissen L. Biaxial testing of normal concrete. *Heron*. 1972; 18(1):1-90.
26. Van Mier J.G.M. *Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions : Ph.D. Thesis*. Eindhoven, Technische Hogeschool Eindhoven, 1984.

27. Mises R.V. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen (Mathematisch-physikalische Klasse)*. 1913; 1:582-592.
28. Rankine W. On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1857; 147:9-27. DOI: 10.1098/rstl.1857.0003
29. Geniev G., Kissuk V., Tupin G. *Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 316. EDN RSNPAX. (rus.).
30. Geniev G. A variant of the strength condition. *Theoretical research in the field of structural mechanics of spatial systems*. 1976; 21-27. (rus.).
31. Leites E.S. To improvement one from conditions of concrete strength. *Behavior of concrete and elements of reinforced concrete structures under exposure of various durations : collection of scientific papers*. 1980; 37-40. (rus.).
32. Yashin A.V. Strength criteria and straining of concrete under simple loading for different stress pattern. *Calculation and design of reinforced concrete structures*. 1977; 48-57. (rus.).
33. Bresler B., Pister K.S. Strength of concrete under combined stresses. *ACI Journal Proceedings*. 1958; 55(9). DOI: 10.14359/11358
34. Leon A. Über die Scherfestigkeit des Betons. *Beton und Eisen*. 1935; 34:130-135.
35. Bigoni D., Piccolroaz A. Yield criteria for quasi-brittle and frictional materials. *International Journal of Solids and Structures*. 2004; 41(11-12):2855-2878. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.12.024
36. Poltronieri F., Piccolroaz A., Bigoni D., Romero Baivier S. A simple and robust elastoplastic constitutive model for concrete. *Engineering Structures*. 2014; 60:81-84. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.12.007
37. Soloviev L.Yu. Non-linear concrete model based on the plastic flow theory. *Systems. Methods. Technologies*. 2014; 4(24):131-140. EDN TFBEMN. (rus.).
38. Petrov A.N. *Deformation model of creep of reinforced concrete and its application to the calculation of plane-stressed elements and systems of them : Ph.D. Thesis*. Moscow, NIIZhB, 2001; 326. (rus.).
39. Karpenko N.I. *General Models of the Reinforced Concrete Mechanics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996; 416. (rus.).
40. Karpenko N.I., Karpenko S.N. For the definition of strength of plain concrete in triaxial stress states. *Concrete and reinforced concrete — a look into the future: scientific proceedings of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. 2014; 156-165. EDN TRROFR. (rus.).
41. Klovanich S.F., Bezushko D.I. Numerical experiment based on investigation of deformation plasticity theory of concrete. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2006; 22:122-130. (rus.).
42. Ottosen N.S. A Failure Criterion for Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1977; 103(4):527-535. DOI: 10.1061/jmcea3.0002248
43. Beverly P. *FIB model code for concrete structures 2010*. 2013.
44. Menetrey P., Willam K.J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995; 92(3). DOI: 10.14359/1132
45. Grassl P., Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure. *International Journal of Solids and Structures*. 2006; 43(22-23):7166-7196. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032
46. Budarin A.M., Rempel G.I., Kamzolkyn A.A., Alekhin V.N. Stress-strain concrete model with double independent reinforcement. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(4):517-532. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532 (rus.).
47. Hsieh S.S., Ting E.C., Chen W.F. A plastic-fracture model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*. 1982; 18(3):181-197. DOI: 10.1016/0020-7683(82)90001-4

Received September 11, 2023.

Adopted in revised form on December 14, 2023.

Approved for publication on April 8, 2024.

B I O N O T E S : **Georgy I. Rempel** — chief specialist of the Structural analysis department; **JSC «Institute Hydroproject»**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; g.rempel@hydroproject.ru;

Alexander M. Budarin — chief specialist of the Structural analysis department; **JSC «Institute Hydroproject»**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; alex.budarin01@gmail.com;

Andrey P. Dolgikh — head of structural analysis department; **JSC «Institute Hydroproject»**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; a.dolgikh@hydroproject.ru;

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

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

Contribution of the authors:

Georgy I. Rempel — research concept, data gathering and processing, scientific editing of the text, creating graphic materials.

Alexander M. Budarin — research concept, data gathering and processing, scientific editing of the text.

Andrey P. Dolgikh — scientific editing of the text.

Alexey A. Kamzolkin — scientific editing of the text, creating graphic materials.

Vladimir N. Alekhin — scientific editing of the text.

The authors declare no conflicts of interests.

Влияние шага ребер жесткости на напряженно-деформированное состояние элементов подкрановой балки

Владислав Сергеевич Маркеев, Виталий Валентинович Зверев,
Илья Алексеевич Зайцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) разрезных подкрановых балок (ПБ), выделены особенности нагружения от катков крана и влияния на НДС элементов ПБ в части образования усталостных трещин в верхней сжатой зоне стенки. Основная задача исследования — поиск особенностей работы конструкции ПБ кранов с тяжелым режимом работы, поиск методов модернизации конструктивных особенностей с целью недопущения/минимизации развития усталостных трещин.

Материалы и методы. За основание для исследования взят многолетний опыт эксплуатации ПБ тяжелого и весьма тяжелого режимов работы кранов, данные заключений по результатам обследований строительных конструкций, заключений по промышленной безопасности опасных производственных объектов, научных публикаций. На базе конструктивных схем существующих и реально эксплуатируемых ПБ металлургического предприятия разработана расчетная модель исследуемой конструкции в вычислительном комплексе прочностного анализа конструкций методом конечных элементов.

Результаты. Проанализировано НДС конструкций ПБ кранов с тяжелым и весьма тяжелым режимами работы, изучено влияние положения катка крана на состояние различных частей конструкции ПБ: стенки, поясов и ребер. Выведена закономерность в работе элементов конструкции при изменении частоты расположения поперечных ребер ПБ. Выдвинуты предположения по решению прочностной задачи образования недопустимых усталостных трещин в верхней сжатой зоне стенки ПБ.

Выводы. По результатам численного анализа НДС модели конструкции ПБ приведены данные, свидетельствующие о малоизвестных ранее особенностях их работы. Приведена гипотеза по решению прочностной задачи образования недопустимых усталостных трещин в верхней сжатой зоне стенки ПБ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подкрановая балка, тяжелый режим работы крана, напряженно-деформированное состояние, усталостная трещина, верхняя сжатая зона стенки, шаг поперечных ребер, усиление подкрановых балок

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маркеев В.С., Зверев В.В., Зайцев И.А. Влияние шага ребер жесткости на напряженно-деформированное состояние элементов подкрановой балки // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 878–891. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.878-891

Автор, ответственный за переписку: Владислав Сергеевич Маркеев, vladmarkeev@yandex.ru.

The effect of the stiffener pitch on the stress-strain state of the crane beam elements

Vladislav S. Markeev, Vitalij V. Zverev, Ilya A. Zajcev
Lipetsk State Technical University (LGTU); Lipetsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A study of the stress-strain state of split crane beams was carried out, the features of loading from the crane rollers and the effect on the stress-strain state of crane beam elements in terms of formation of fatigue cracks in the upper compressed zone of the wall were highlighted. The main objective of the study is to search for the features of the crane beam construction of cranes with heavy operation mode, to search for methods of modernization of design features in order to prevent/minimize the development of fatigue cracks.

Materials and methods. The research is based on long-term experience in the operation of crane beams of heavy and especially heavy operating modes of cranes, data from conclusions based on the results of surveys of building structures, conclusions on industrial safety of hazardous production facilities, scientific publications. Based on the design schemes of existing and actually operated crane beams of the metallurgical enterprise, a computational model of the structure under study was developed in the computational complex of strength analysis of structures by the method of finite element analysis.

Results. The stress-strain state of crane beam structures of cranes with heavy and especially heavy operating modes is analyzed, the influence of the position of the crane roller on the condition of various parts of the crane beam structure: walls, belts and ribs is studied. The regularity in the work of structural elements is derived when the frequency of the transverse ribs of crane beams changes. Assumptions are made to solve the strength problem of the formation of unacceptable fatigue cracks in the upper compressed zone of the crane beam wall.

Conclusions. Based on the results of numerical analysis of the stress-strain state of the crane beam construction model, data are presented indicating the previously unknown peculiarities of crane beams operation. A hypothesis is given for solving the strength problem of the formation of unacceptable fatigue cracks in the upper compressed zone of the crane beam wall.

KEYWORDS: crane beam, heavy crane operation mode, stress-strain state, fatigue crack, upper compressed zone of the wall, pitch of transverse ribs, reinforcement of crane beams

FOR CITATION: Markeev V.S., Zverev V.V., Zajcev I.A. The effect of the stiffener pitch on the stress-strain state of the crane beam elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):878-891. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.878-891 (rus.).

Corresponding author: Vladislav S. Markeev, vladmarkeev@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний опыт эксплуатации промышленных объектов различных отраслей и в первую очередь цехов металлургического производства ввиду сложных условий эксплуатации показывает [1–10], что на сегодняшний момент остается актуальной проблема раннего выхода из строя из-за образования недопустимых дефектов подкрановых балок (ПБ) с тяжелым и весьма тяжелым режимами работы кранов (7-8К).

Анализ опыта эксплуатации ПБ и публикаций на эту тему в пределах последних 50 лет [9–12] и за последнее десятилетие [1–8, 13–16] позволяет говорить, что усталостные трещины в различных элементах ПБ являются наиболее распространенными и наряду с этим наиболее опасными дефектами и повреждениями.

На основании опыта авторов и анализа опубликованных исследований [1, 9, 11, 17] в общем виде усталостные трещины можно классифицировать по следующим группам (рис. 1):

- I — трещины, возникающие и развивающиеся в верхней поясной зоне:
 - 1 — в околошовной зоне стенки ПБ;
 - 2 — в наплавленном металле шва таврового сопряжения пояса и стенки;

3 — с переходом из металла шва в околошовную зону стенки;

- II — в месте примыкания поперечных ребер к стенке:
 - 1 — от ребра жесткости;
 - 2 — под короткими ребрами жесткости;

- III — трещины в ребре жесткости;
- IV — трещины в поясах балки;
- V — наклонные трещины в металле стенки в приопорной зоне.

Многочисленные публикации по изучению особенностей работы ПБ, возникновению и развитию трещин показывают, что основными причинами развития наиболее распространенных усталостных трещин I типа являются:

- непровар корня шва [18], нарушение требования СП 16.13330¹ п. 15.6.1: «верхние поясные швы в балках крановых путей для кранов групп режимов работы 7К (в цехах металлургических производств)

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с поправкой, с Изменением № 1) : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27.02.2017 № 126/пр, введен в действие с 28.08.2017. 181 с.

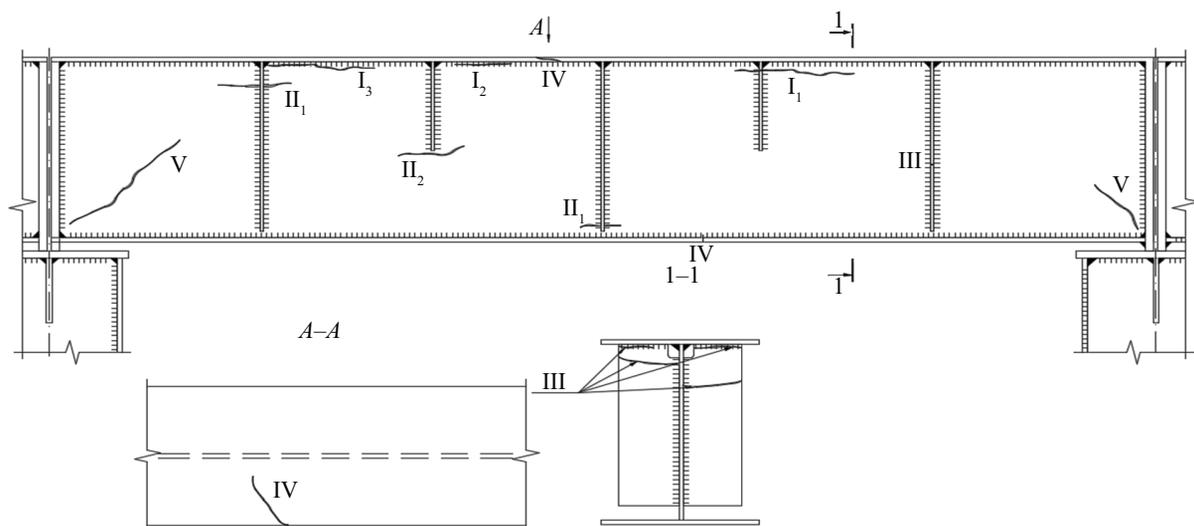


Рис. 1. Классификация усталостных трещин составных подкрановых балок

Fig. 1. Classification of fatigue cracks of composite crane beams

и 8К следует выполнять с проваром на всю толщину стенки», и как следствие, появление концентратора напряжений (рис. 2);

- смещение рельса, вызывающее внецентренное приложение нагрузки от катка крана относительно оси стенки ПБ, приводящее к сложному напряженно-деформированному состоянию (НДС) верхней сжатой зоны (ВЗС) стенки ПБ и модульному повышению главных и эквивалентных напряжений в стенке (рис. 3).

По опыту авторов статьи в цехах с кранами с тяжелым и весьма тяжелым режимами работы усталостные трещины I типа зачастую проявляются ранее других дефектов.



Рис. 2. Непровар корня шва. Образование концентратора напряжений

Fig. 2. Incomplete root penetration. Stress concentrator formation

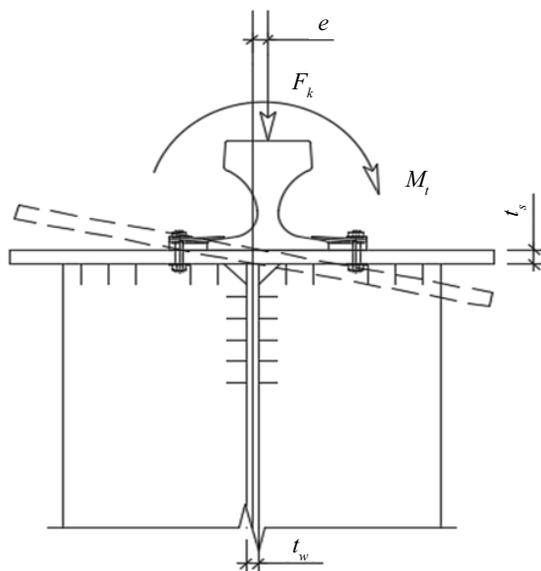


Рис. 3. Эксцентриситет приложения нагрузки от катка крана при смещении рельса

Fig. 3. Eccentricity of the application of the load from the crane roller when the rail is displaced

В работе [15] также показано, что общая доля трещин данного типа составляет до 90 % от общего количества усталостных трещин ПБ тяжелого и весьма тяжелого режимов работы кранов. Похожие сведения приводятся в публикациях [19–21].

Главная задача настоящего исследования — изучение особенностей НДС различных элементов ПБ при внецентренном приложении нагрузки от катка крана, вызванного смещением рельса кранового пути и приводящего по итогу к ускорению образования усталостных трещин в ВЗС ПБ.

В статье рассматривается линейный расчет численной модели ПБ с однократным статическим нагружением от катка крана для выявления общих закономерностей распределения локальных напряжений в элементах ПБ от локальной нагрузки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для моделирования и проведения исследования выбран кислородно-конверторный цех, миксерное отделение одного из металлургических предприятий Российской Федерации. В исследуемом пролете цеха функционируют 3 мостовых крана грузоподъемностью 180 т, пролетом 34,0 м. Режим работы кранов — тяжелый (7К).

Подкрановые балки выполнены по разрезной схеме пролетом 12,0 м, общей высотой 2040 мм в соответствии с индивидуальным проектом, тормозные конструкции (тормозной настил, тормозная ферма и горизонтальные связи) в соответствии с типовой серией². Подкрановые конструкции изготовлены из стали С355 с расчетным сопротивлением $R_y = 350 \text{ Н/мм}^2$ (35 690 т/м²).

Общие габаритные размеры и конструктивные решения приведены на рис. 4.

С целью моделирования и расчета ПБ использован проектно-вычислительный комплекс конечно-элементного моделирования и анализа SCAD Office версии 21.1.9.11.

Модель (рис. 5) построена четырехузловыми оболочками типа 44 — 4-угольные конечно-элементные оболочки, имеющие 6 степеней свободы: X, Y, Z, U_x, U_y, U_z . Для большей точности вычислений расчетная модель разбита на оболочки со сторонами от 20 до 25 мм. Количество узлов/элементов схемы — 157 499/155 434.

Для более релевантной картины получаемых результатов НДС элементов при построении модели в программном комплексе SCAD были учтены следующие конструктивные решения и особенности

² Серия 1.426.2-5. Стальные подкрановые балки для объектов черной металлургии. Выпуск 1 : утв. главным управлением организации типового проектирования Госстроя СССР от 19.04.1989, введен в действие с 01.01.1990, приказ ЦИТП Госстроя СССР от 14.08.89 № 52.

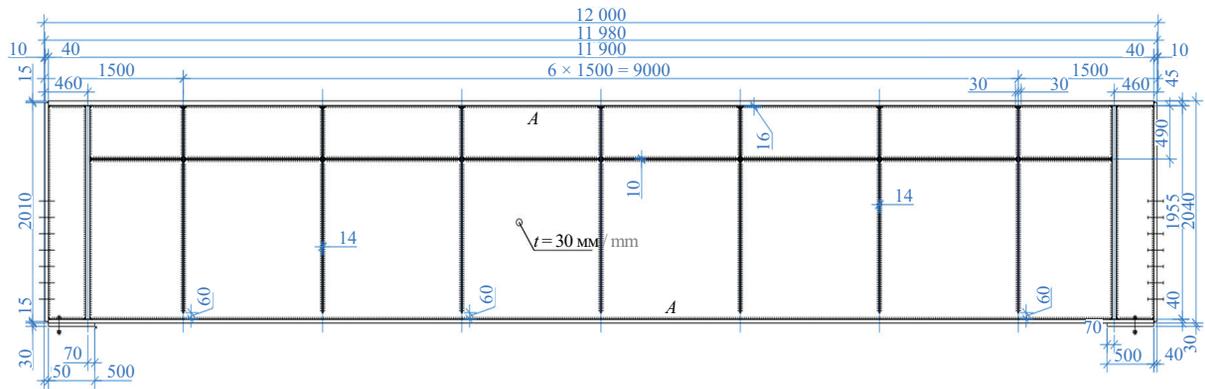


Рис. 4. Габаритный чертеж исследуемой подкрановой балки

Fig. 4. Dimensional drawing of the crane beam under study

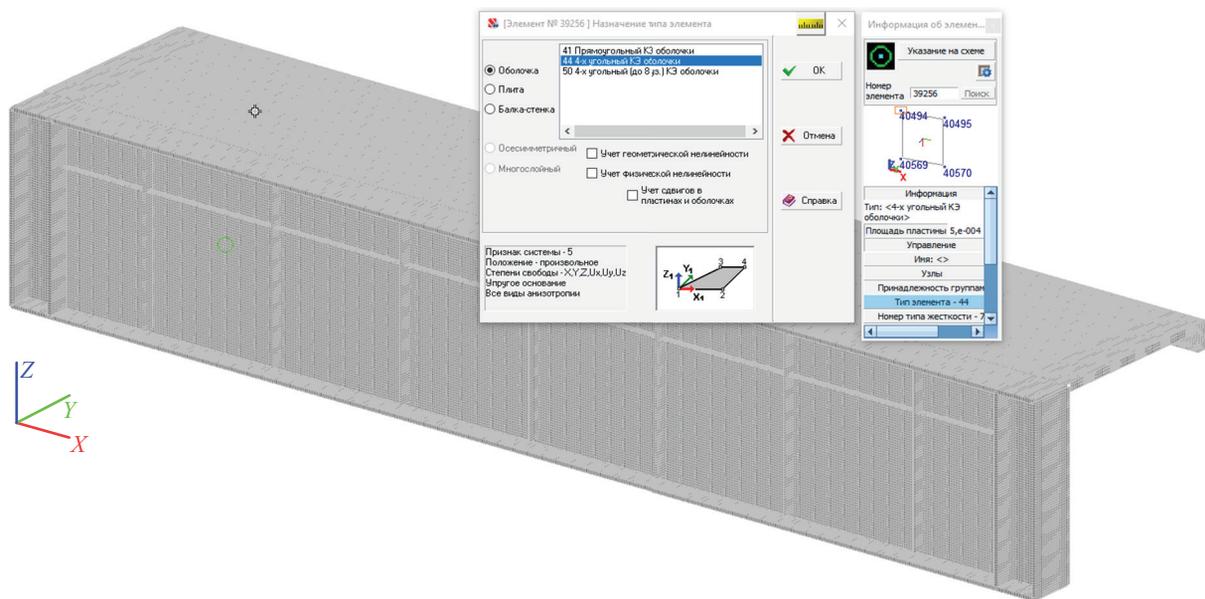


Рис. 5. Моделируемая конструкция ПБ. Типы КЭ. Разбиение и триангуляция модели

Fig. 5. The simulated design of crane beams. Types of finite elements. Partitioning and triangulation of the model

нагрузки конструкции:

- в соответствии с требованиями СП 16.13330¹ поперечные ребра жесткости не доведены до нижнего пояса на 60 мм и не приварены к верхнему поясу, а только плотно подогнаны/пристроганы к нему. Модель предусматривает передачу усилий от пояса на ребра при помощи функции «Объединение перемещений»;
- учтено наличие прямоугольных вырезов размерами 60 × 40 мм в поперечных и продольных ребрах (рис. 6);
- в местах опирания ПБ на колонны каркаса предусмотрена установка болтов М30. При моделировании предусмотрены вырезы, соответствующие размерам отверстий под болты (рис. 7).

Согласно требованиям СП 16.13330¹, действующая на балку сосредоточенная нагрузка от колеса крана распределяется рельсом и поясом на некоторый участок стенки, вследствие чего в металле ВЗС возникают местные нормальные напряжения $\sigma_{loc,y}$ (рис. 8).

Действительную эпюру распределения этих напряжений можно заменить равновеликой из условия равенства их максимальных значений. Прочность стенки на действие максимальных местных напряжений проверяют по формуле:

$$\delta_{loc,y} = \gamma_f \gamma_{fl} F_n / (t_w l_{ef}) \leq R_y \gamma_c, \quad (1)$$

где γ_f — коэффициент надежности по нагрузке; γ_{fl} — коэффициент увеличения нагрузки на колесе, учитывающий возможное перераспределение усилий между колесами и динамический характер нагрузки; F_n — нормативная нагрузка от колеса крана без учета динамичности; t_w — толщина стенки; l_{ef} — условная расчетная длина распределения усилия F_n .

Согласно этому требованию, единичная нагрузка от катка крана прикладывается к поясу ПБ на площади (345 × 170 мм), соответствующей ширине «подошвы» рельса и условной расчетной длине l_{ef} распределения усилия F_n , зависящей от жестко-

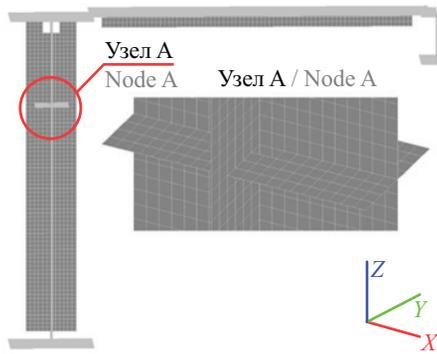


Рис. 6. Моделируемое сечение, сопряжение продольных и поперечных ребер со стенкой ПБ

Fig. 6. Simulated cross-section, interface of longitudinal and transverse ribs with the crane beam wall

сти пояса, рельса и сопряжения пояса со стенкой (рис. 9), определяемой по формуле:

$$l_{ef} = c\sqrt{I_{1f} / t_w}, \quad (2)$$

где c — коэффициент, учитывающий степень податливости сопряжения пояса и стенки, для сварных балок $c = 3,25$, клепаных — $3,75$; I_{1f} — сумма собственных моментов инерции пояса и кранового рельса.

Расчетная длина распределения усилия показана на рис. 9.

Сбор нагрузок, моделирование нагружения

Нагрузки на рассчитываемую ПБ собраны в соответствии с действующей нормативно-технической документацией (НТД)³, основными данными для на-

³ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85* : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 03.12.2016 № 891/пр; введен в действие с 04.06.2017. М. : Стандартинформ; ФГБУ «РСТ», 2017. 95 с.

гружения послужили паспорта эксплуатируемых кранов. Информация по крановым нагрузкам сведена в табл. 1.

Результаты геодезической исполнительной съемки подкранового пути исследуемого цеха показали наибольший эксцентриситет 28 мм. Однако авторы работы [13] отмечают, что максимальные смещения подкранового рельса, фиксируемые при обследованиях подкрановых путей, зачастую составляют до 40–45 мм. Для дальнейшего моделирования примем эксцентриситеты приложения нагрузки до 50 мм относительно оси стенки ПБ.

Для анализа влияния эксцентриситета приложения нагрузки на НДС стенки ПБ выбраны три положения катка крана: проектное (без смещения рельса), со смещением 25 и 50 мм. При этом действующий государственный стандарт⁴ регламентирует конструктивный допуск на прямолинейность рельса в горизонтальной плоскости в любой точке рельсового пути для кранового оборудования данного цеха не более ± 10 мм.

Нагрузка от одного колеса принята по максимальному значению, соответствующему нагрузке от крана № 2, и равна 56,08 тс.

На данном этапе исследований рассматривалось распределение напряжений в элементах балки при локальном приложении нагрузки от одного колеса крана с эксцентриситетом. Нагружение моделировалось в соответствии со схемой, приведенной на рис. 10.

В дальнейшем предполагается учесть особенности перераспределения напряжений при полном (реальном) нагружении ПБ от всех колес крана (кранов), при постановке дополнительных ребер,

⁴ ГОСТ 34020–2016. Краны грузоподъемные. Допуски для колес, рельсовых путей кранов и их грузовых тележек : введен 17.03.2017. М. : Стандартинформ, 2017. 25 с.

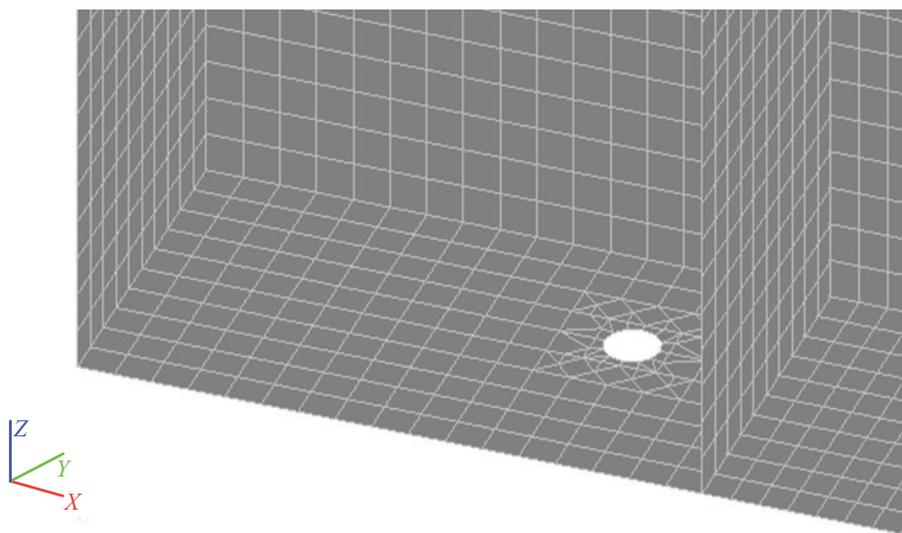


Рис. 7. Моделируемое отверстие под постоянные крепежные болты

Fig. 7. Simulated hole for permanent mounting bolts

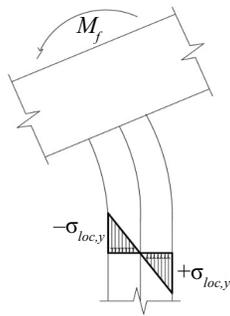


Рис. 8. Схема распределения нормальных напряжений при кручении пояса балки

Fig. 8. The scheme of distribution of normal stresses during torsion of the beam belt

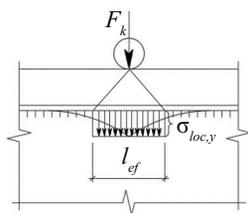


Рис. 9. Расчетная длина распределения усилия

Fig. 9. Estimated length of force distribution

что позволит оценить общее НДС балки и учесть влияние изменения шага поперечных ребер жесткости.

При моделировании положение единичной нагрузки давления катка крана задавалось в соответствии со схемой, представленной на рис. 10.

Нагрузка от колеса крана поочередно прикладывалась в трех положениях по длине балки: у опорного ребра, в промежуточном положении, в центре балки.

В пределах одного отсека (участка стенки, ограниченного двумя поперечными ребрами) нагрузка также прикладывалась в трех положениях: непосредственно над ребром, в промежуточном положении, в центре отсека.

По результатам анализа НДС в элементах исследуемой ПБ, приведенным в табл. 2, можно отметить, что при приближении нагрузки к поперечному ребру жесткости локальные напряжения в стенке падают (в среднем в 2 раза в сравнении с положением нагрузки в середине отсека).

С целью проверки влияния работы поперечных ребер жесткости на НДС ВЗС была смоделирована постановка дополнительных ребер жесткости с уменьшением шага в отсеке в 2 раза (с 1500 до 750 мм) в соответствии со схемой, представленной на рис. 11.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все результаты численного анализа НДС элементов исследуемой ПБ, загруженной в соответствии с рис. 10, полученные при помощи конечно-элементного анализа, сведены в табл. 2, в графическом виде представлены на рис. 12.

Некоторые иллюстрации результатов графического анализа изополей главных и эквивалентных напряжений, выданных ПК SCAD после выполнения линейного расчета, представлены на рис. 13, 14.

Значения напряжений в элементах ПБ схемы с меньшим шагом поперечных ребер приведены в табл. 3 и на рис. 15.

Влияние эксцентриситета приложения крановой нагрузки на характер изменения НДС элементов ПБ для схемы с проектным шагом поперечных ребер жесткости можно проследить по иллюстрациям изополей напряжений, представленных на рис. 16.

Табл. 1. Паспорта эксплуатируемых кранов

Table 1. Passports of operated cranes

Наименование Name	Грузоподъемность, т Load capacity, t			Пролет, м Span, m	Масса, т Weight, t	Нагрузка на рельс, кН Load on the rail, kN		Тип рельса Rail type	Режим работы Operating mode
	ос- нов- ная main	вспомога- тельная 1 supportive 1	вспомога- тельная 2 supportive 2			верти- кальная vertical	горизон- тальная horizontal		
Паспорт крана № 1 Crane passport No. 1	180	50	20	34	434,77	550	55	КР120	7К
Паспорт крана № 2 Crane passport No. 2	180	50	20	34	420	543	54,3		7К
Паспорт крана № 3 Crane passport No. 3	180	50	20	34	458	500	50		7К

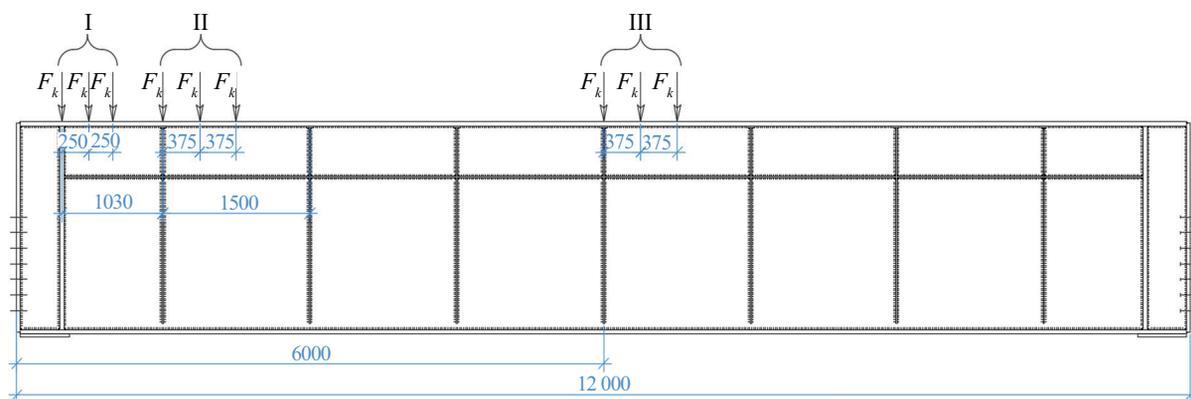


Рис. 10. Исходная схема приложения единичной нагрузки от колеса крана

Fig. 10. Initial scheme of unit load application from the crane wheel

Табл. 2. Результаты численного анализа главных и эквивалентных напряжений элементов ПБ исходного сечения

Table 2. Results of numerical analysis of the main and equivalent stresses of crane girder elements of the initial section

I. В опорном отсеке In the support compartment									
Напряжения в стенке, т/м ² Stresses in the wall, t/m ²			Напряжения в опорном ребре, т/м ² Stresses in the support rib, t/m ²			Напряжения в верхнем поясе, т/м ² Stresses in the upper belt, t/m ²			
Положение в отсеке Position in the compartment	Эксцентриситет смещения катка крана Eccentricity displacement of the crane roller								
	e = 0 мм, проект. mm, project.	e = 25 мм mm	e = 50 мм mm	e = 0 мм, проект. mm, project.	e = 25 мм mm	e = 50 мм mm	e = 0 мм, проект. mm, project.	e = 25 мм mm	e = 50 мм mm
	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)
Над опорным ребром Above the supporting rib	4092,34	4062,17 -1	4261,85 +104	3529,26	3672,37 +104	3962,56 +112	2402,25	3196,44 +133	4647,39 +193
Промежуточное Intermediate	5051,65	7515,07 +149	9835,92 +195	2207,85	3196,18 +145	4101,51 +185	3292,92	4491,22 +136	7428,95 +225
В центре отсека In the centre of the compartment	5135,99	8415,65 +164	11 550,24 +225	648,44	1149,85 +177	1724,82 +266	3951,23	5011,41 +127	7811,17 +198
II. В промежуточном отсеке In the intermediate compartment									
Напряжения в стенке, т/м ² Stresses in the wall, t/m ²			Напряжения в ребрах жесткости, т/м ² Stresses in the stiffeners, t/m ²			Напряжения в верхнем поясе, т/м ² Stresses in the upper belt, t/m ²			
Положение в отсеке Position in the compartment	Эксцентриситет смещения катка крана Eccentricity displacement of the crane roller								
	e = 0 мм, проект. mm, project.	e = 25 мм mm	e = 50 мм mm	e = 0 мм, проект. mm, project.	e = 25 мм mm	e = 50 мм mm	e = 0 мм, проект. mm, project.	e = 25 мм mm	e = 50 мм mm
	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)
Над опорным ребром Above the supporting rib	2683,88	2939,17 +110	3207,38/ +119	1158,8	1274,32 +110	1321,67 +114	4042,74	5259,24 +130	6007,17 +149
Промежуточное Intermediate	5265,15	9092,31 +172	12 737,12 +242	1272,93	1962,22 +154	2848,36 +224	3836,91	5463,82 +142	9142,85 +239
В центре отсека In the centre of the compartment	5225,67	9868,51 +189	14 363,69 +275	244,54	1171,19 +480	2096,23 +860	4015,86	5123,66 +128	8036,57 +200

III. В середине балки In the middle of the beam									
Напряжения в стенке, т/м ² Stresses in the wall, t/m ²			Напряжения в ребрах жесткости, т/м ² Stresses in the stiffeners, t/m ²			Напряжения в верхнем поясе, т/м ² Stresses in the upper belt, t/m ²			
Положение в отсеке Position in the compartment	Эксцентриситет смещения катка крана Eccentricity displacement of the crane roller								
	$e = 0$ мм, проект. mm, project.	$e = 25$ мм mm	$e = 50$ мм mm	$e = 0$ мм, проект. mm, project.	$e = 25$ мм mm	$e = 50$ мм mm	$e = 0$ мм, проект. mm, project.	$e = 25$ мм mm	$e = 50$ мм mm
	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)
Над опорным ребром Above the supporting rib	2672,66	2450,93 -9	2392,35 -11	2091,23	2219,68 +105	2094,7 0	7307,16	7669,79 +105	8727,96 +119
Промежуточное Intermediate	5248,78	9170,16 +175	12 910,33 +245	4051,67	4344,55 +107	4611,65 +114	4926,28	6507,51 +132	7875,63 +160
В центре отсека In the centre of the compartment	5212,6	9870,00 +189	14 346,29 +275	3062,51	3420,22 +112	3740,2 +122	4009,53	5143,55 +128	7958,4 +198

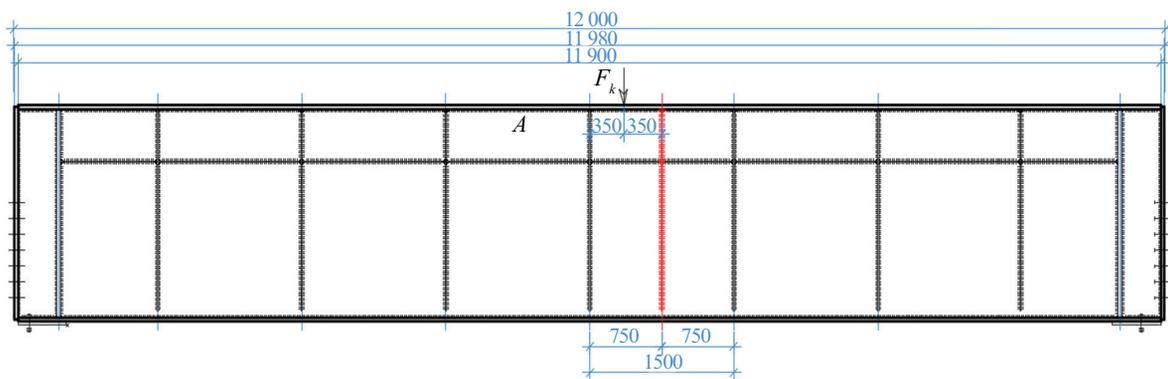


Рис. 11. Схема балки с установкой дополнительных ребер жесткости

Fig. 11. Beam diagram with installation of additional stiffeners

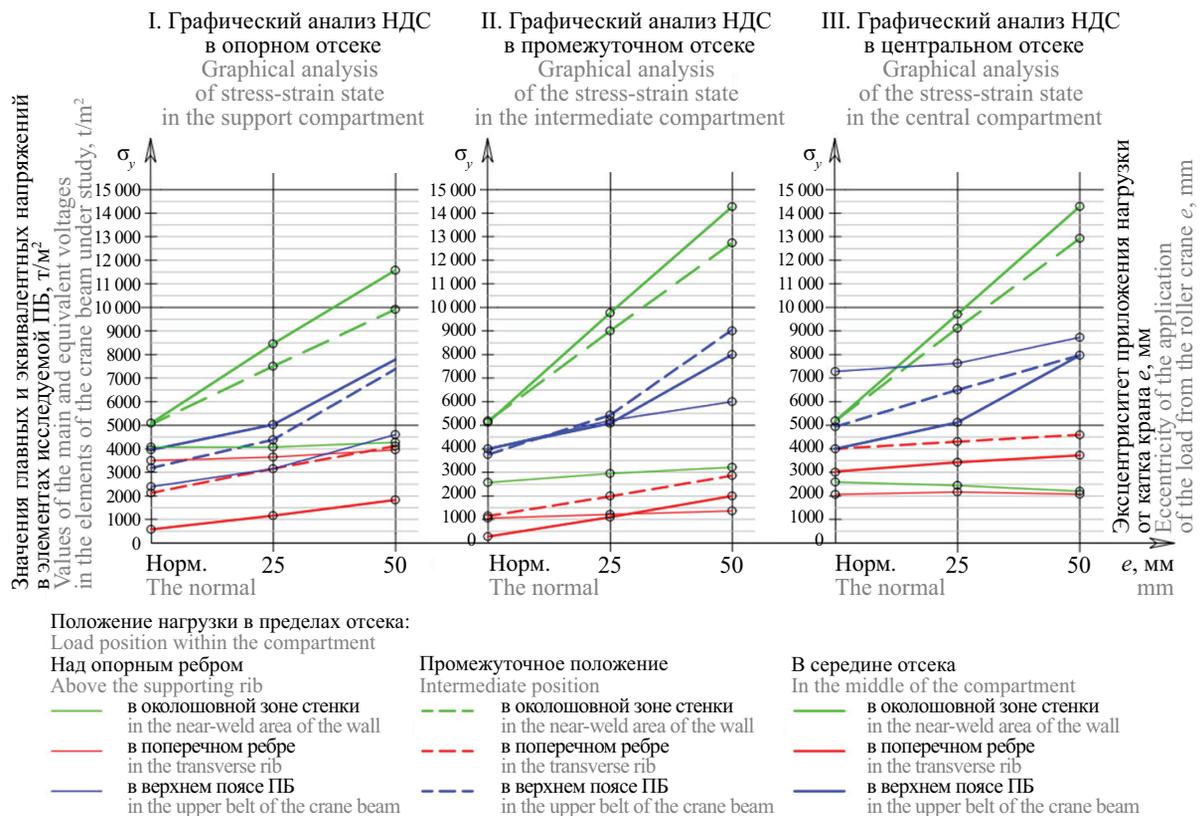


Рис. 12. Графические результаты анализа НДС исходной схемы ПБ по результатам табл. 2

Fig. 12. Graphical results of the analysis of the stress-strain state of the initial crane beam scheme on the results of Table 2

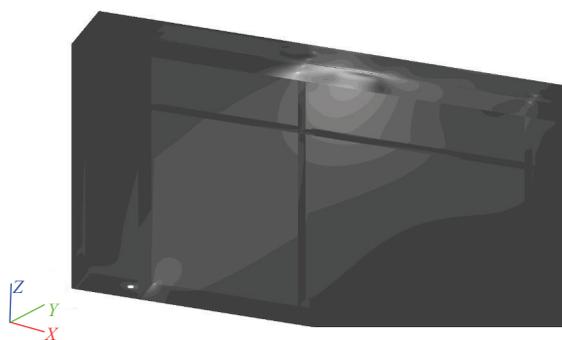


Рис. 13. Иллюстрация изополей напряжений в элементах ПБ при промежуточном положении нагрузки в отсеке с эксцентриситетом $e = 25$ мм (промежуточное положение крановой нагрузки в пролете балки)

Fig. 13. The picture of the stress isofields in the crane beam elements at the intermediate position of the load in the compartment with eccentricity of $e = 25$ mm (intermediate position of the crane load in the beam span)

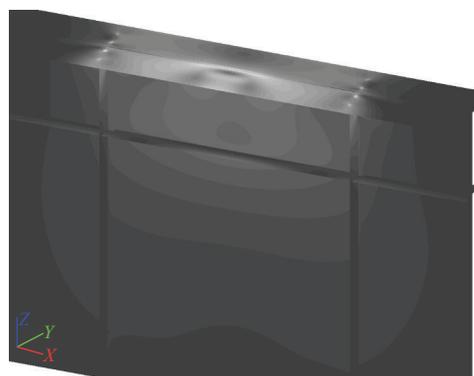


Рис. 14. Иллюстрация изополей напряжений в элементах ПБ при положении нагрузки в середине отсека с эксцентриситетом $e = 50$ мм (центральное положение в пролете балки)

Fig. 14. Illustration of stress isofields in the crane beam elements at the load position in the middle of the compartment with an eccentricity of $e = 50$ mm (central position in the beam span)

Табл. 3. Результаты численного анализа главных и эквивалентных напряжений элементов ПБ при постановке дополнительных ребер

Table 3. Results of numerical analysis of the main and equivalent stresses of the crane beam elements when setting additional ribs

I. Исходная схема The original scheme									
Напряжения в стенке, т/м ² Stresses in the wall, t/m ²			Напряжения в ребрах жесткости, т/м ² Stresses in the stiffeners, t/m ²			Напряжения в верхнем поясе, т/м ² Stresses in the upper belt, t/m ²			
Положение в отсеке Position in the compartment	Эксцентриситет смещения катка крана Eccentricity displacement of the crane roller								
	$e = 0$ мм, норм. mm, the norm.	$e = 25$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 50$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 0$ мм, норм. mm, the norm.	$e = 25$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 50$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 0$ мм, норм. mm, the norm.	$e = 25$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 50$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)
В центре отсека In the centre of the compartment	5212,6	9870,00 +189	14 346,29 +275	3062,51	3420,22 +112	3740,2 +122	4009,53	5143,55 +128	7958,4 +198
II. Схема с частой постановкой ребер A scheme with frequent setting of ribs									
Напряжения в стенке, т/м ² Stresses in the wall, t/m ²			Напряжения в ребрах жесткости, т/м ² Stresses in the stiffeners, t/m ²			Напряжения в верхнем поясе, т/м ² Stresses in the upper belt, t/m ²			
Положение в отсеке Position in the compartment	Эксцентриситет смещения катка крана Eccentricity displacement of the crane roller								
	$e = 0$ мм, норм. mm, the norm.	$e = 25$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 50$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 0$ мм, норм. mm, the norm.	$e = 25$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 50$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 0$ мм, норм. mm, the norm.	$e = 25$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)	$e = 50$ мм mm $\Delta\delta_y$ (от норм.), %/ (from the norms.)
В центре отсека In the centre of the compartment	5243,42	8343,61 +159	11 258,7 +215	3929,48	4016,45 +102	4126,7 +105	3675,75	4497,81 123	6995,13 +191

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Напряжения в верхней околошовной зоне стенки при приложении нагрузки в середине отсека растут прямо пропорционально с увеличением

эксцентриситета приложения крановой нагрузки, что свидетельствует о недостаточной жесткости на кручение традиционного двутаврового сечения подкрановой балки.

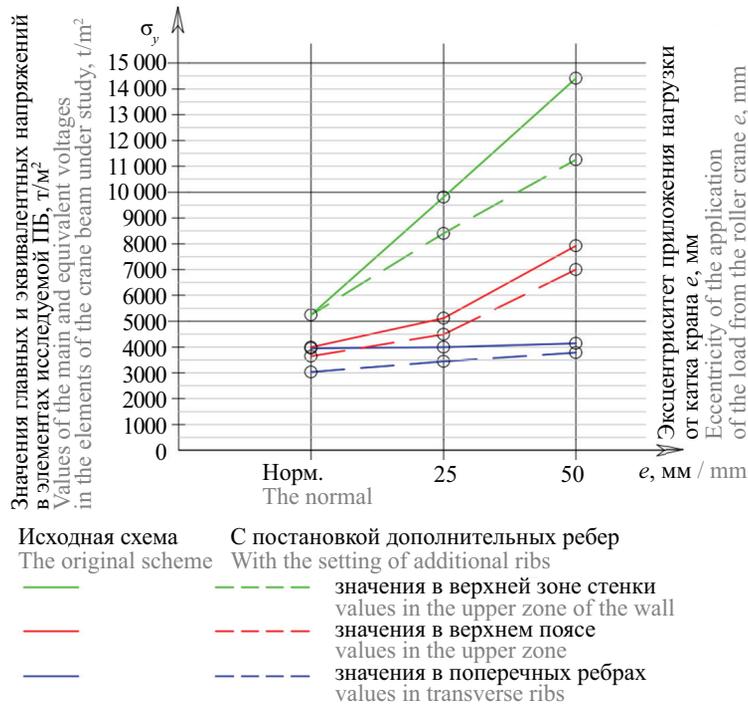


Рис. 15. Графические результаты анализа НДС при постановке дополнительных ребер жесткости по результатам табл. 3
Fig. 15. Graphical results of the analysis of the stress-strain state when setting additional stiffeners on the results of Table 3

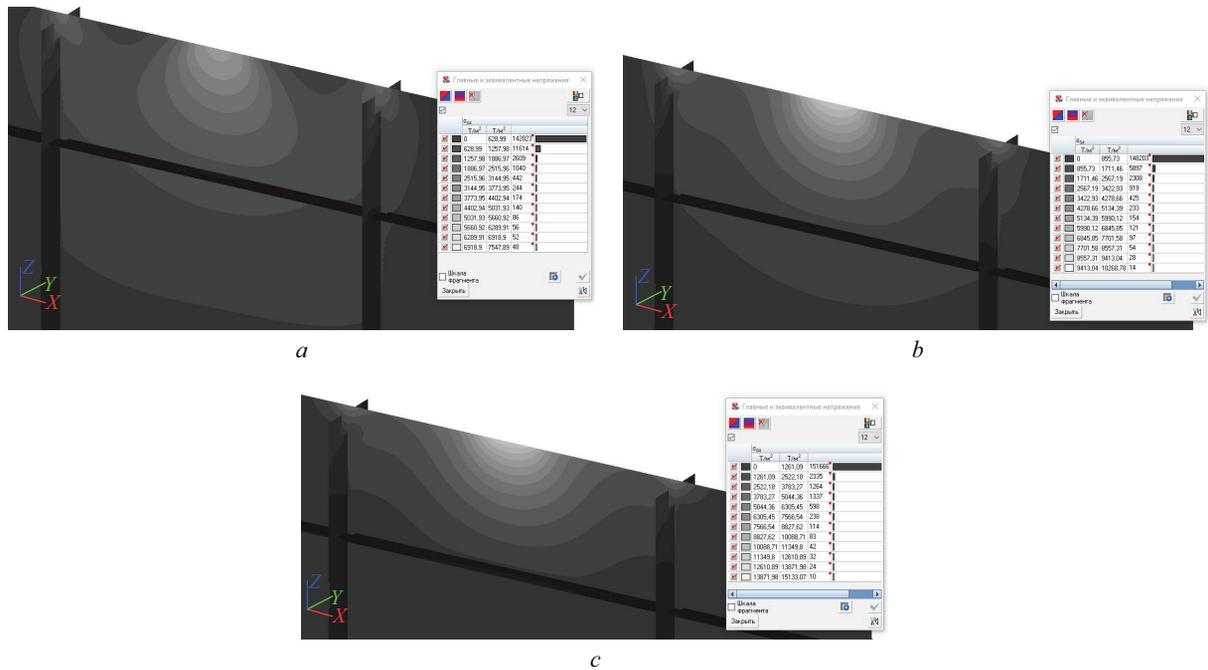


Рис. 16. Нагрузка в середине отсека с эксцентриситетом: a — e = 0 мм; b — e = 25 мм; c — e = 50 мм (в середине пролета балки)

Fig. 16. Load in the middle of the compartment with eccentricity of: a — e = 0 mm; b — e = 25 mm; c — e = 50 mm (in the middle of the beam span)

Это объясняется тем, что подкрепление стенки поперечными ребрами действует на довольно коротком участке, определяемом формулой¹:

$$a = 0,65t_w \sqrt{E / R_y}. \quad (3)$$

Напряжения в поперечном ребре (со стороны, в которую смещен рельс) в зоне сопряжения с верхним поясом показывают прямо пропорциональный рост при увеличении эксцентриситета приложения крановой нагрузки, наибольшие показатели напря-

жения наблюдаются при приближении нагрузки к поперечному ребру жесткости.

При увеличении эксцентриситета приложения нагрузки и росте напряжений в ВЗС происходит перераспределение напряжений, «пятно» напряжений перемещается вверх ближе к околошовной зоне, но максимальные по модулю напряжения в околошовной зоне действуют на большей протяженности (рис. 16).

Анализ НДС схемы при постановке дополнительных ребер жесткости (уменьшение шага) (табл. 3) показал:

- постановка дополнительных ребер жесткости не влияет на максимальные локальные напряжения в верхней околошовной зоне стенки при нормативном положении кранового рельса;
- при положении подкранового рельса с эксцентриситетом наблюдается снижение напряжения в околошовной зоне стенки (порядка 20–30 %), напряжения в ребрах жесткости возрастают до 25 %.

Действующий СП 16.13330¹, п. 7.3.3 регламентирует назначать расстояния между ребрами жесткости исходя из требований местной устойчивости стенки ПБ в соответствии с формулой:

$$a = 2,5h_{ef}. \quad (4)$$

В исследовании выдвигается новая гипотеза, которая предполагает, что постановка ребер жесткости с шагом меньше, чем того требует действующий нормативный документ¹, отчасти позволяет решить прочностную задачу изгиба ВЗС ПБ и снизить ве-

роятность образования усталостных трещин в ней при положении нагрузки с эксцентриситетом. Постановка дополнительных ребер предположительно снижает напряжения в ВЗС ПБ существенным образом.

Подробная проверка выдвинутой гипотезы по результатам данной публикации выносится как задача дальнейшей исследовательской работы группы авторов и планируемой кандидатской диссертации.

Способы усиления верхней зоны ПБ в определенной степени известны давно и приведены в научно-технической и инженерной литературе⁵. Вместе с тем проблема актуальна и в научных публикациях последних лет [22–27]. Эти решения все еще мало изучены, а некоторые имеют ряд конструктивных недостатков:

- значительное повышение материалоемкости готовых изделий;
- усложнение изготовления, монтажа подкрановых конструкций;
- затруднение текущих осмотров, периодических и внеочередных обследований, обследований в рамках экспертизы промышленной безопасности.

Необходимы дальнейшие исследования по разработке конструктивных решений по недопущению образования усталостных трещин в ВЗС ПБ, а также проверка выдвинутой гипотезы.

⁵Руководство по восстановительному ремонту подкрановых конструкций. М. : Министерство металлургии СССР, 1991. 118 с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Выдрин В.Н., Зубко О.В. Наиболее характерные дефекты и повреждения металлических эксплуатируемых подкрановых балок при проведении экспертизы промышленной безопасности // Символ науки: международный научный журнал. 2015. № 10–2. С. 102–109. EDN SMKQEM.
2. Xie Y. Anti-fatigue performance analysis on steel crane beam // Sensors & Transducers. 2013. Vol. 21. Special Issue. Pp. 73–77.
3. Sowa L., Skrzypczak T., Kwiaton P. The effect of the gantry crane beam cross section on the level of generated stresses // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 157. P. 02047. DOI: 10.1051/mateconf/201815702047
4. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowinski S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders — Locations, causes and calculations // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. Issue 1. Pp. 69–82. DOI: 10.1016/j.acme.2017.05.003
5. Danilov A., Tushina O. Non-disruptive method to decrease stresses in the web of the crane beam // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302022
6. Hong Y., Lu Y., Zheng Z. Initiation and propagation of short fatigue cracks in a weld metal // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1989. Vol. 12. Issue 4. Pp. 323–331. DOI: 10.1016/0142-1123(89)90268-5
7. Meng D., Li G., Tan D., Yang S. Finite element analysis on crane girder with variable cross sections based on ANSYS // Sensors & Transducers. 2013. Vol. 21. Special Issue. Pp. 89–94.
8. Крахмальний Т.А., Евтушенко С.И. Дефекты и повреждения металлических подкрановых балок производственных зданий // Строительство и архитектура. 2021. Т. 9. № 3. С. 11–15. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-11-15. EDN BTXPAR.
9. Бабкин В.И. Оценка циклической трещиностойкости сварных подкрановых балок тяжелого режима работы : дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 164 с.
10. Довженко А.С. Причины разрушения верхних поясных швов подкрановых балок // Материалы по стальным конструкциям. 1958. № 2. С. 195–209.
11. Shuryn A., Mukhin A., Bryantsev A. Defects of steel crane beams and methods of their strengthening //

E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 212. P. 02016. DOI: 10.1051/e3sconf/202021202016

12. Патрикеев А.Б. О механизме разрушения верхних участков стальных подкрановых балок // Промышленное строительство. 1971. № 5. С. 38–43.

13. Дмитриева О.А., Новикова М.А., Тарасова Д.А. Сварные подкрановые балки — проблемы расчета и причины разрушения // X Всероссийский фестиваль науки : сб. докл. 2020. С. 34–37. EDN UEJOFW.

14. Нежданов К.Н., Кузьмишкин А.А., Гарькин И.Н. Предотвращение усталостных трещин в узле соединения рельса с подкрановой балкой // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 161. EDN VIDVIX.

15. Кубасевич А.Е. Устойчивость стенок подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 47–53. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-47-53. EDN OSJUXJ.

16. Москвичев В.В., Чабан Е.А. Исследование напряженно-деформированного состояния подкрановых балок в штатных режимах эксплуатации // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 4. С. 572–584. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-4-572-584. EDN WBXECR.

17. Складнев А.И., Сердюк В.В. Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенки сварных подкрановых балок // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 11. С. 34–36. EDN JVVWQP.

18. Беляев Б.И., Корниенко В.С. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения. М. : Стройиздат, 1986. 206 с.

19. Железнов А.А. Местная устойчивость стенок сварных подкрановых балок с трещинами : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1996. 144 с.

20. Кикин А.И., Эглескалн Ю.С. Результаты обследования подкрановых конструкций, запроектиро-

ванных по действующим нормам // Промышленное строительство. 1968. № 12. С. 38–39.

21. Белый Г.И., Кубасевич А.Е. Влияние геометрических несовершенств сжатого пояса на несущую способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 14–20. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-14-20. EDN GERMUB.

22. Черкашин Е.Г. Исследование влияния способов усиления верхней зоны стенки подкрановых балок // Вестник магистратуры. 2022. № 5–1 (128). С. 29–32. EDN HYQWLG.

23. Сабуров В.Ф., Серебренникова Е.Н., Фердер А.В. О некоторых особенностях формирования напряженно-деформированного состояния в стенке подкрановых балок при движении крана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Т. 22. № 2. С. 14–20. DOI: 10.14529/build220202. EDN HTBLJC.

24. Чалков Г.В. Напряжения в стенках подкрановых балок повышенного ресурса при местном кручении верхнего пояса : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 175 с.

25. Лампси Б.Б., Лампси Б.Б., Маркина Ю.Д. Усиление стальных подкрановых балок при модернизации технологического процесса // Приволжский научный журнал. 2022. № 2 (62). С. 24–28. EDN LBFVVY.

26. Лампси Б.Б., Хисамова Л.Д., Хазов П.А. Расчетная оценка усталостной долговечности стальной подкрановой балки // Приволжский научный журнал. 2021. № 1 (57). С. 18–24. EDN JXTMTH.

27. Емельянов О.В., Миннатов А.Р. Влияние эксцентриситета передачи нагрузки от колеса мостового крана на напряженное состояние стенки подкрановой балки // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тез. докл. 79-й междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 452. EDN IQXXZD.

Поступила в редакцию 18 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 30 января 2024 г.

Одобрена для публикации 31 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владислав Сергеевич Маркеев** — аспирант кафедры металлических конструкций; **Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)**; 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30; mailbox@stu.lipetsk.ru, vladmarkeev@yandex.ru;

Виталий Валентинович Зверев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций; **Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)**; 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30; mailbox@stu.lipetsk.ru, zverev2901@gmail.com;

Илья Алексеевич Зайцев — магистр кафедры металлических конструкций; **Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)**; 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30; mailbox@stu.lipetsk.ru, ilja.saicew@yandex.ru.

Вклад авторов:

Маркеев В.С. — концепция исследования, развитие методологии, разработка расчетной модели исследуемой конструкции в вычислительном комплексе прочностного анализа конструкций МКЭ, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зверев В.В. — научное руководство, фактологическая и стилистическая редакция финального текста, итоговые выводы.

Зайцев И.А. — развитие методологии, разработка расчетной модели исследуемой конструкции в вычислительном комплексе прочностного анализа конструкций МКЭ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vydrin V.N., Zubko O.V. The most characteristic defects and damages of metal crane beams operated during the examination of industrial safety. *Symbol of Science : International Scientific Journal*. 2015; 10-2:102-109. EDN SMKQEM. (rus.).
2. Xie Y. Anti-fatigue performance analysis on steel crane beam. *Sensors & Transducers*. 2013; 21(Special Issue):73-77.
3. Sowa L., Skrzypczak T., Kwiaton P. The effect of the gantry crane beam cross section on the level of generated stresses. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 157:02047. DOI: 10.1051/mateconf/201815702047
4. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowinski S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders — Locations, causes and calculations. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018; 18(1):69-82. DOI: 10.1016/j.acme.2017.05.003
5. Danilov A., Tushina O. Non-disruptive method to decrease stresses in the web of the crane beam. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302022
6. Hong Y., Lu Y., Zheng Z. Initiation and propagation of short fatigue cracks in a weld metal. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1989; 12(4):323-331. DOI: 10.1016/0142-1123(89)90268-5
7. Meng D., Li G., Tan D., Yang S. Finite element analysis on crane girder with variable cross sections based on ANSYS. *Sensors & Transducers*. 2013; 21(Special Issue):89-94.
8. Krakhmalnyy T., Evtushenko S. Defects and damages of metal crane beams of industrial buildings. *Construction and Architecture*. 2021; 9(3):11-15. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-11-15 EDN BXPXPAR. (rus.).
9. Babkin V.I. *Assessment of cyclic crack resistance of welded crane beams of heavy duty operation : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1985; 164. (rus.).
10. Dovzhenko A.S. Causes of destruction of the upper belt seams of crane beams. *Materials on Steel Structures*. 1958; 2:195-209. (rus.).
11. Shurny A., Mukhin A., Bryantsev A. Defects of steel crane beams and methods of their strengthening. *E3S Web of Conferences*. 2020; 212:02016. DOI: 10.1051/e3sconf/202021202016
12. Patrikeev A.B. On the mechanism of destruction of the upper sections of steel crane beams. *Industrial Construction*. 1971; 5:38-43. (rus.).
13. Dmitrieva O.A., Novikova M.A., Tarasova D.A. Welded crane beams — calculation problems and causes of destruction. *X All-Russian Science Festival : collection of reports*. 2020; 34-37. EDN UEJOFW. (rus.).
14. Nezhdanov K.N., Kuzmishkin A.A., Garkin I.N. Prevention of fatigue cracks in the rail junction node crane beams. *Modern Problems of Science and Education*. 2015; 1-1:161. EDN VIDVIX. (rus.).
15. Kubasevich A.E. Stability of crane girder walls with fatigue cracks in the compressed belt zone. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 4(81):47-53. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-47-53. EDN OSJUXJ. (rus.).
16. Moskvichev V.V., Chaban E.A. Investigation of the stress-strain state of crane beams in normal operating modes. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016; 9(4):572-584. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-4-572-584. EDN WBXECR. (rus.).
17. Sklyadnev A.I., Serdyuk V.V. Fatigue durability and the measure of damage to the upper zone of the wall of welded crane beams. *Occupational Safety in Industry*. 2004; 11:34-36. EDN JVVWQP. (rus.).
18. Belyaev B.I., Kornienko V.S. *Causes of accidents of steel structures and ways to eliminate them*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 206. (rus.).
19. Zheleznov A.A. *Local stability of the walls of welded crane beams with cracks : dis. ... cand. tech. sciences*. Novosibirsk, 1996; 144. (rus.).
20. Kikin A.I., Egleskaln Y.S. The results of the survey of crane structures designed according to current standards. *Industrial Construction*. 1968; 12:38-39. (rus.).
21. Belyy G.I., Kubasevich A.E. The effect of geometric imperfections of the compressed belt on the bearing capacity of crane beams with fatigue cracks in the wall. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 3(92):14-20. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-14-20. EDN GERMUB. (rus.).
22. Cherkashin E.G. Investigation of the influence of ways to strengthen the upper zone of the crane beams wall. *Bulletin of Magistracy*. 2022; 5-1(128):29-32. EDN HYQWLG. (rus.).
23. Saburov V.F., Serebrennikova E.N., Ferder A.V. On the specifics of the formation of stress-strain state of the wall of crane beams during crane movement. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering*

and Architecture". 2022; 22(2):14-20. DOI: 10.14529/build220202. EDN HTBLJC. (rus.).

24. Chalkov G.V. *Stresses in the walls of crane beams of increased resource at local torsion of the upper belt : dis. ...cand. tech. sciences*. Novosibirsk, 2012; 175. (rus.).

25. Lampsı B.B., Lampsı B.B., Markina Yu.D. Reinforcement of steel crane beams during technological process modernization. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2022; 2(62):24-28. EDN LBFVVY. (rus.).

26. Lampsı B.B., Khisamova L.D., Khazov P.A. Estimated fatigue life of a steel crane girder. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2021; 1(57):18-24. EDN JXTMTH. (rus.).

27. Emelyanov O.V., Minnatov A.R. Influence of the eccentricity of the load transfer from the wheel of the bridge crane on the stress state of the crane beam wall. *Current problems of modern science, technology and education : abstracts of the 79th international scientific and technical conference*. 2021; 452. EDN IQXXZD. (rus.).

Received September 18, 2023.

Adopted in revised form on January 30, 2024.

Approved for publication on January 31, 2024.

BI O N O T E S: **Vladislav S. Markeev** — postgraduate student of the Department of Metal Structures; **Lipetsk State Technical University (LGTU)**; 30 Moskovskaya st., Lipetsk, 398055, Russian Federation; mailbox@stu.lipetsk.ru, vladmarkeev@yandex.ru;

Vitalij V. Zverev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Structures; **Lipetsk State Technical University (LGTU)**; 30 Moskovskaya st., Lipetsk, 398055, Russian Federation; mailbox@stu.lipetsk.ru, zverev2901@gmail.com;

Ilya A. Zajcev — master of the Department of Metal Structure; **Lipetsk State Technical University (LGTU)**; 30 Moskovskaya st., Lipetsk, 398055, Russian Federation; mailbox@stu.lipetsk.ru, ilja.saicew@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Vladislav S. Markeev — research concept, development of methodology, development of a computational model of the studied structure in the computational complex of strength analysis of FEM structures, writing of the source text, final conclusions.

Vitalij V. Zverev — scientific guidance, factual and stylistic editing of the final text, final conclusions.

Ilya A. Zajcev — development of methodology, development of a computational model of the studied structure in the computational complex of strength analysis of FE structures.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Особенности проектирования монолитных бетонных фундаментных плит с композитной полимерной арматурой

Константин Львович Кудяков^{1,2}, Андрей Викторович Бучкин¹

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. За последнее десятилетие увеличилась доля бетонных конструкций, армированных композитной полимерной арматурой (АКП), что связано в том числе с развитием нормативно-технической базы в данном направлении. Присущие АКП особенности, во многом обусловленные свойствами ее компонентов, которые необходимо учитывать на всех этапах строительства и эксплуатации здания, приводят к некоторым изменениям в традиционных для железобетона подходах к проектированию конструкций и технологии их возведения.

Материалы и методы. Выполнен обзор отечественного опыта применения арматуры композитной полимерной при строительстве монолитных бетонных фундаментов. Рассмотрен пример проектно-конструкторских решений фундаментной плиты, на основе анализа которого был осуществлен подбор армирования из АКП по результатам расчетов по первой и второй группам предельных состояний.

Результаты. Обозначены особенности проектирования, которые следует учитывать при расчете фундаментных плит из бетона, армированного АКП. На конкретном примере монолитной бетонной фундаментной плиты показано влияние учета фактических механических характеристик АКП на результаты расчетов по прочности и трещиностойкости. Результаты расчетов, выполненные по различным редакциям нормативных документов, актуальным на период с 2014 по 2023 г., наглядно демонстрируют развитие нормативной базы в части учета свойств АКП в армированных бетонных конструкциях.

Выводы. При рациональном подходе к процессам проектирования возможно разрабатывать проекты бетонных фундаментных плит на упругом основании с применением АКП, отвечающие требованиям нормативных документов по надежности. Имеется возможность полного исключения металлических элементов (арматуры, изделий, закладных деталей) в таких конструкциях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: арматура композитная полимерная, АКП, стеклокомпозитная арматура, неметаллическая стержневая арматура, армированные бетонные конструкции, проектирование монолитных фундаментных плит

Благодарности. Авторы выражают благодарность указанным в статье организациям за предоставленные материалы и информацию.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кудяков К.Л., Бучкин А.В. Особенности проектирования монолитных бетонных фундаментных плит с композитной полимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 892–905. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.892-905

Автор, ответственный за переписку: Константин Львович Кудяков, konst_k@mail.ru.

Design of monolithic concrete foundation slabs with FRP reinforcement

Konstantin L. Kudyakov^{1,2}, Andrey V. Buchkin¹

¹ Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after: A.A. Gvozdeva JSC "Research Center "Construction"; Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Over the past decade, the share of concrete structures reinforced with composite polymer reinforcement (FRP) has increased, which is due, among other things, to the development of the regulatory and technical framework in this direction. The inherent features of FRP, largely determined by the properties of its components, which must be taken into account at all stages of construction and operation of the building, lead to some changes in the traditional approaches to the design of structures and the technology of their construction.

Materials and methods. A review of domestic experience in the use of composite polymer reinforcement in the construction of monolithic concrete foundations is carried out. An example of design and construction solutions of a foundation plate is

considered. On the basis of its analysis, the selection of reinforcement from FRP was carried out according to the results of calculations for the first and second groups of limit states.

Results. Design features that should be taken into account when calculating foundation slabs made of concrete reinforced with FRP are indicated. The concrete example of a monolithic concrete foundation slab shows the effect of taking into account the actual mechanical characteristics of FRP on the results of strength and crack resistance calculations. The results of calculations carried out according to various editions of regulatory documents relevant for the period from 2014 to 2023 clearly demonstrate the development of the regulatory framework in terms of taking into account the FRP properties in reinforced concrete structures.

Conclusions. With a rational approach to design processes, it is possible to develop projects of concrete foundation slabs on an elastic base using FRP that meet the requirements of regulatory documents on reliability. It is possible to completely exclude metal elements (fittings, products, embedded parts) in such structures.

KEYWORDS: fibre reinforcement polymer rebar, FRP, GFRP, non-metal core reinforcement, reinforced concrete structures, design of monolithic foundation slabs

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the organizations indicated in the paper for the materials and information provided.

FOR CITATION: Kudyakov K.L., Buchkin A.V. Design of monolithic concrete foundation slabs with FRP reinforcement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):892-905. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.892-905 (rus.).

Corresponding author: Konstantin L. Kudyakov, konst_k@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность использования конструкций, армированных композитной полимерной арматурой (АКП), при армировании бетонных конструкций зданий и сооружений определяется наличием у АКП ряда особенностей, которые необходимо учитывать на всех этапах строительства и эксплуатации здания. Эти особенности также приводят к некоторым изменениям в традиционных для железобетона подходах к проектированию конструкций и технологии их возведения и вызывают настороженность к данному материалу у многих проектных и строительных организаций. Это усугубляется обилием информации в открытых источниках, которая неполно или недостоверно описывает действительные характеристики и особенности АКП, а также ее достоинства и недостатки в сравнении с традиционной стальной арматурой. Широко распространены так называемые «таблицы равнопрочной замены»,

в которых отражены содержащиеся ошибки результаты (данными таблицами пользоваться недопустимо). Совокупность этих факторов приводит к тому, что инженеры при разработке проектных решений в основном прибегают к традиционным материалам. Тем не менее рациональное и обоснованное применение АКП при армировании бетонных и фибробетонных конструкций перспективно [1–20].

Непосредственной областью применения АКП является армирование бетонных фундаментов. Использование АКП отмечается как в частном, так и в промышленно-гражданском строительстве (рис. 1).

Имеется и уникальный опыт строительства фундаментов под многоэтажные офисные, производственные и жилые здания:

- фундаментная плита 7-этажного офисного здания, основное армирование плиты из АКП, г. Москва, ул. Верейская, 2013 г. (рис. 2);



a



b



Рис. 1. Общий вид бетонных фундаментов, армированных АКП от различных производителей, для малоэтажных зданий (использованы фотоматериалы из открытых интернет-ресурсов): *a* — ООО «Гален» (URL: <https://www.galencomposite.ru/>); *b* — АО «ХЭЛП Композит» (URL: <https://helpcomposite.ru/>); *c* — ГК «Армпласт» (URL: <https://arm-plast.ru/>); *d* — ООО «КОМПОЗИТ ГРУПП ЧЕЛЯБИНСК» (URL: <http://compositgroup74.ru/>); *e* — ООО «Композит 21» (URL: <https://21kompozit.ru/>)

Fig. 1. General view of concrete foundations reinforced with FRP from various manufacturers for low-rise buildings (photo materials from open Internet resources were used): *a* — “Galen” LLC (URL: <https://www.galencomposite.ru/>); *b* — “HELP Composite” JSC (URL: <https://helpcomposite.ru/>); *c* — “Armplast” Group of Companies (URL: <https://arm-plast.ru/>); *d* — “KOMPOZIT GROUP CHELYABINSK” LLC (URL: <http://compositgroup74.ru/>); *e* — “Kompozit 21” LLC (URL: <https://21kompozit.ru/>)

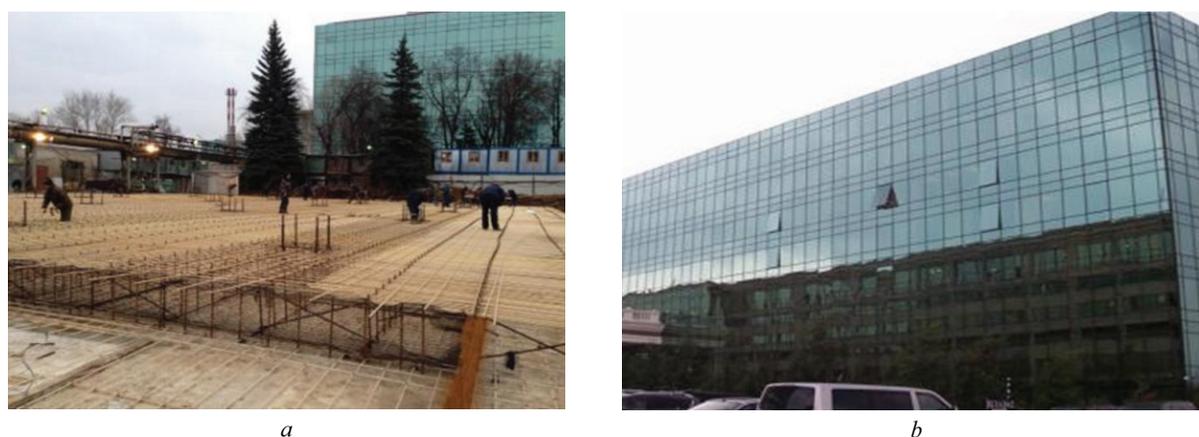


Рис. 2. Армирование фундаментной плиты (*a*) и офисного здания по ул. Вере́йская, г. Москва (*b*) (фотоматериалы предоставлены Ассоциацией «Композитные строительные материалы» (до 2015 г. — Ассоциация ОППНКА «Неметаллическая композитная арматура»))

Fig. 2. Reinforcement of the foundation slab (*a*) and the office building in Vereyskaya st., Moscow (*b*) (photo materials provided by the Association “Composite Building Materials” (until 2015 — the Association of Non-metallic Composite Reinforcement))



Рис. 3. Общий вид армирования фундаментной плиты (а) и офисного здания по ул. Буракова, г. Москва (б) (фотоматериалы предоставлены Ассоциацией «Композитные строительные материалы»)

Fig. 3. General view of reinforcement of the foundation slab (a) and the office building in Burakova st., Moscow (b) (photo materials provided by the Association “Composite Building Materials”)



Рис. 4. Фундаментные плиты (а) и производственное здание под швейный цех по ул. Голубева, г. Ижевск (б) (фотоматериалы предоставлены ООО «КомАР»)

Fig. 4. Foundation slabs (a) and the production building for the sewing workshop in Golubeva St., Izhevsk (b) (photo materials provided by KomAR LLC)



Рис. 5. Общий вид армирования фундаментной плиты 15-этажного жилого дома в ЖК «Саларьево Парк», г. Москва (URL: <https://galencomposite.ru/>; URL: <https://mgsu.ru>)

Fig. 5. General view of the reinforcement of the foundation slab of a 15-storey residential building in the residential complex “Salarievo Park”, Moscow (URL: <https://galencomposite.ru/>; URL: <https://mgsu.ru>)



Рис. 6. Армирование фундаментной плиты 17-этажного жилого дома в ЖК «Дрожжино-2», д. Дрожжино, Московская обл. (URL: <https://galencomposite.ru/>)

Fig. 6. Reinforcement of the foundation slab of a 17-storey residential building in the residential complex “Drozhhino-2”, Drozhzhino village, Moscow region (URL: <https://galencomposite.ru/>)

- фундаментная плита 4-этажного офисного здания, основное армирование плиты из АКП, г. Москва, ул. Буракова, 2013 г. (рис. 3);

- фундаментные плиты хранилищ, Мурманская обл., 2015 г. [13];

- фундаментная плита 4-этажного производственного здания под швейный цех, основное армирование плиты из АКП, г. Ижевск, ул. Голубева, 2018 г. (рис. 4);

- фундаментная плита 15-этажного жилого дома, основное армирование плиты из АКП, г. Москва, д. Саларьево, 2017 г. (рис. 5) [12];

- фундаментная плита 6-секционного 17-этажного жилого дома, основное армирование верхней зоны плиты из АКП, Московская обл., д. Дрожжино, 2016 г. (рис. 6).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Стальная арматура имеет статистически обоснованную, весьма широкую и при этом достаточно жесткую классификацию по механическим характеристикам. Иная ситуация сложилась с АКП, показатели и качество которой могут зависеть от множества факторов: сырье, состав, технология производства, контроль качества и прочее. Нормами допускается при расчетах конструкций принимать значения механических характеристик АКП, определенные с обеспеченностью не менее 0,95 по результатам испытаний в соответствии с ГОСТ 32492, но не ниже величин, указанных в ГОСТ 31938 и СП 295.1325800. Фактические показатели прочности и деформативности АКП, выполненной по ГОСТ 31938, могут отличаться от обозначенных в нормах величин. Например, прочность при растяжении арматуры стеклокомпозитной (АСК) может варьироваться в диапазоне от 800 МПа (минимальное значение по СП 295.1325800 — 800 МПа; в ГОСТ 31938–2022 — 1000 МПа) до 1100–1250 МПа, а модуль упругости при растяжении от 50 до 57 ГПа. Таким образом, наличие подтвержденных данных о фактических механических характеристиках той

или иной АКП (паспорт качества, протоколы испытаний, результаты приемо-сдаточных испытаний и прочее) может существенно влиять на результаты инженерных расчетов [14–16].

Проектирование бетонных конструкций с АКП несколько отличается от традиционных подходов, применяемых к железобетонным конструкциям, и имеет свою специфику [17–28]. Ниже приведены некоторые ее проявления, существенно влияющие на результаты подбора параметров армирования АКП в изгибаемых бетонных элементах на упругом основании.

Исходя из опыта проектирования пролетных изгибаемых бетонных конструкций с АКП, преобладающим фактором, влияющим на окончательный подбор количества рабочей продольной АКП, являются результаты расчета конструкций по 2-й группе предельных состояний, в частности — расчетные значения деформаций и ширины раскрытия трещин [28–34].

В связи с этим немаловажным является новое изложение п. 6.2.10 СП 295.1325800.2017, приведенное в соответствующем Изменении № 1 (введено в действие 16.06.2021). В соответствии с ним для прямоугольных сечений упругопластический момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна бетона W_{pl} допускается принимать равным произведению упругого момента сопротивления приведенного сечения по растянутой зоне сечения W_{red} и коэффициента γ , который учитывает неупругие свойства бетона растянутой зоны сечения:

$$W_{pl} = \gamma \cdot W_{red},$$

где $\gamma = 1,73 - 0,005 \cdot (B - 15)$; B — числовая характеристика класса бетона по прочности на осевое сжатие.

Так, для армированных АКП конструкций из бетона класса В25, с учетом положений Изменения № 1 к СП 295.1325800.2017, величина коэффициента γ увеличивается с 1,3 (в соответствии с предыдущей редакцией документа) до 1,68, что приводит к аналогичному увеличению расчетного значения момента образования трещин M_{crc} . В свою очередь, это приводит к уменьшению ве-

личины коэффициента ψ_f , учитывающего неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами, и, как следствие, происходит снижение расчетных значений ширины продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин a_{cr} . Таким образом, по результатам расчетов конструкций по второй группе предельных состояний требуемая площадь продольной рабочей арматуры может уменьшаться.

При расчетах изгибаемых бетонных конструкций с АКП, помимо прочих требований СП 295.1325800, необходимо уделять особое внимание соблюдению следующих положений, учитывающих особенности АКП и имеющих отличия от аналогичных требований для железобетонных конструкций:

- учитывая снижение прочности АКП при длительном действии нагрузки, при расчетах конструкций рекомендуется дополнительно выполнять проверку по предельным состояниям первой группы при действии только постоянных и длительных нагрузок. При таких расчетах следует применять сопротивление АКП растяжению при длительных нагрузках R_{fd} (п. 5.2.7 СП 295.1325800);
- при наличии трещин в сечении изгибаемого элемента должно выполняться условие $M_{ult} \geq 1,5M_{cr}$ (п. 6.1.3 СП 295.1325800);
- АКП обладает высокой коррозионной стойкостью. В связи с этим толщина защитного слоя бетона для рабочей АКП в монолитных конструкциях, в том числе в фундаментах, должна составлять не менее 25 мм (п. 8.2.2 СП 295.1325800);
- в изгибаемых элементах величина процента рабочего армирования μ_f должна быть не менее 0,13 % (п. 8.2.5 СП 295.1325800);
- при должном обосновании и соблюдении качества строительных работ допускается не устраи-

вать вторичную защиту от коррозии для бетонных конструкций с АКП.

Рассмотрим варианты армирования монолитной бетонной фундаментной плиты на упругом грунтовом основании. Толщина фундаментной плиты 800 мм, бетон класса по прочности на сжатие В25. Исследованы стальная арматура класса А500С по ГОСТ Р 52544–2006 и АСК по ГОСТ 31938–2022. Для АСК приняты минимально допустимые ($R_{f,n} = 1000$ МПа; $E_f = 50$ ГПа) и повышенные ($R_{f,n} = 1150$ МПа; $E_f = 55$ ГПа) значения механических характеристик с учетом имеющейся на рынке строительных материалов РФ арматуры.

В качестве исходных данных использованы сведения из проектной документации (многоэтажный жилой дом), в которой было рассмотрено 2 варианта армирования фундаментной плиты: полностью из стальной арматуры (вариант 1) и комбинированное армирование из стальной арматуры и АСК (вариант 2). Кроме этого, принимались во внимание результаты анализа конечно-элементной модели фундаментной плиты, выполненные с учетом проектных нагрузок и фактических коэффициентов постели, вычисленных по данным инженерно-геологических изысканий.

Исходные данные для разработки вариантов армирования фундаментной плиты приняты следующими (табл. 1):

Вариант 1. Принят в соответствии с проектной документацией. Проектные решения разработаны с учетом требований актуального на тот момент СП 63.13330.2012. Рассмотрена только стальная арматура класса А500С.

Вариант 2. Разработан по результатам расчетного обоснования замены проектных решений армирования фундамента стальной арматурой на АСК с учетом допусков и требований Приложения Л

Табл. 1. Исходные параметры для разработки вариантов армирования фундаментной плиты

Table 1. Initial parameters for the development of reinforcement options for the foundation slab

Параметры Parameters		Варианты армирования фундаментной плиты (толщина плиты 800 мм, класс бетона В25) The reinforcement options for the foundation slab (slab thickness 800 mm, concrete class В25)			
		Вариант 1 (по проекту) Option 1 (by project)	Вариант 2 (по проекту) Option 2 (by project)	Вариант 3 Option 3	Вариант 4 Option 4
Вид армирования плиты Type of the slab reinforcement	Фоновая арматура верхней зоны, шаг 200 мм Main reinforcement of the upper zone, 200 mm pitch	А500С по ГОСТ Р 52544–2006	АСК по ГОСТ 31938–2012 (введен в действие 01.01.2014)	АСК по ГОСТ 31938–2012	АСК по ГОСТ 31938–2022 (введен с 01.09.2022)
	Дополнительная арматура усиления верхней зоны, шаг 200 мм Additional reinforcement of the upper zone, 200 mm pitch	А500С according to GOST R 52544–2006	GFRP according to GOST 31938–2012 (in effect since 01.01.2014)	GFRP according to GOST 31938–2012	GFRP according to GOST 31938–2022 (in effect since 01.09.2022)

Параметры Parameters		Варианты армирования фундаментной плиты (толщина плиты 800 мм, класс бетона В25) The reinforcement options for the foundation slab (slab thickness 800 mm, concrete class B25)			
		Вариант 1 (по проекту) Option 1 (by project)	Вариант 2 (по проекту) Option 2 (by project)	Вариант 3 Option 3	Вариант 4 Option 4
Вид армирования плиты Type of the slab reinforcement	Фоновая арматура нижней зоны, шаг 200 мм Main reinforcement of the lower zone, 200 mm pitch	A500C по ГОСТ Р 52544–2006 A500C according to GOST R 52544–2006	A500C по ГОСТ Р 52544–2006 A500C according to GOST R 52544–2006	АСК по ГОСТ 31938–2012 GFRP according to GOST 31938–2012	АСК по ГОСТ 31938–2022 (введен с 01.09.2022) GFRP according to GOST 31938–2022 (in effect since 01.09.2022)
	Дополнительная арматура усиления нижней зоны, шаг 200 мм Additional reinforcement of the lower zone, 200 mm pitch				
	Гнутые элементы контура, шаг 200 мм Bent contour elements, 200 mm pitch				
Величина защитного слоя бетона (верхняя и нижняя зоны плиты), мм The value of the protective layer of concrete (upper and lower zones of the slab), mm		40	40	25	25
Применяемый нормативный документ для расчетов плиты и подбора арматуры Applicable regulatory document for slab calculations and rebar selection		СП 63.13330.2012 SP 63.13330.2012	Изменение № 1 к СП 63.13330.2012 (введено 13.07.2015) Amendment No. 1 to SP 63.13330.2012 (in effect since 13.07.2015)	СП 295.1325800.2017 (введен 12.01.2018) SP 295.1325800.2017 (in effect since 12.01.2018)	Изменение № 1 к СП 295.1325800.2017 (введено с 16.06.2020) Amendment No. 1 to SP 295.1325800.2017 (in effect since 16.06.2020)
Механические характеристики арматуры Mechanical characteristics of the reinforcement	Нормативные Regulatory	$R_{s,n} = 500$ МПа; $E_s = 200$ ГПа $R_{s,n} = 500$ МПа; $E_s = 200$ ГПа	$R_{fn} = 1150$ МПа; $E_f = 55$ ГПа $R_{fn} = 1,150$ МПа; $E_f = 55$ ГПа	$R_{fn} = 1000$ МПа; $E_f = 50$ ГПа $R_{fn} = 1,000$ МПа; $E_f = 50$ ГПа	$R_{fn} = 1150$ МПа; $E_f = 55$ ГПа $R_{fn} = 1,150$ МПа; $E_f = 55$ ГПа
	Расчетные Design	$R_s = 435$ МПа; $R_{sc} = 400–435$ МПа $R_s = 435$ МПа; $R_{sc} = 400–435$ МПа	$R_f = 583,3$ МПа; $R_{fl} = 345$ МПа; $R_c = 0$ $R_f = 583.3$ МПа; $R_{fl} = 345$ МПа; $R_c = 0$	$R_f = 513,3$ МПа; $R_{fl} = 300$ МПа; $R_c = 0$ $R_f = 513.3$ МПа; $R_{fl} = 300$ МПа; $R_c = 0$	$R_f = 583,3$ МПа; $R_{fl} = 345$ МПа; $R_c = 0$ $R_f = 583.3$ МПа; $R_{fl} = 345$ МПа; $R_c = 0$

СП 63.13330.2012 (с Изменением № 1). Рассмотрена АСК с повышенными механическими характеристиками.

Вариант 3. Разработан с учетом допусков и требований СП 295.1325800.2017. Рассмотрена АСК с минимальными механическими характеристиками (по ГОСТ 31938–2022).

Вариант 4. Разработан с учетом допусков и требований СП 295.1325800.2017 (с Изменением № 1). Рассмотрена АСК с повышенными механическими характеристиками.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом исходных данных и результатов расчетов по 1-й и 2-й группам предельных состояний

в соответствии с обозначенными выше нормативными документами разработаны варианты 3 и 4 для армирования фундаментной плиты (табл. 2, 3).

Принципиальная схема армирования плиты для вариантов 1 и 2 приведена на рис. 7; для вариантов 3 и 4 принята аналогичная схема армирования с учетом изменения толщины защитного слоя бетона, которая составила 25 мм.

Во всех рассмотренных вариантах армирования в верхней зоне плиты трещины не образуются. В вариантах 1 и 2 в нижней зоне плиты образуются нормальные трещины с шириной раскрытия до 0,2 мм, что не превышает предельные значения по СП 63.13330. В вариантах 3 и 4 в нижней зоне плиты образуются

Табл. 2. Результаты подбора АКП для вариантов 3 и 4 по результатам расчетов фундаментной плиты по 1-й и 2-й группам предельных состояний и с учетом конструктивных требований

Table 2. The results of the selection of FRP for options 3 and 4 based on the results of calculations of the foundation slab for 1 and 2 groups of limit states and taking into account design requirements

Номер варианта подбора арматуры Number of the fitting selection option	Характеристики композитной арматуры и некоторые расчетные зависимости Characteristics of GFRP reinforcement and some design dependencies	Зона поперечного сечения плиты Zone of the cross section of the slab		Требуемые площади продольной рабочей АСК в фундаментной плите и соответствующие им варианты подбора армирования (величин защитного слоя бетона 25 мм) The required areas of the longitudinal GFRP in the foundation slab and their corresponding options for the selection of reinforcement (the value of the protective layer of concrete 25 mm)			по минимальным конструктивным требованиям СП 295.1325800.2017 (п. 8.2.5) / according to the minimum design requirements of CP 295.1325800.2017 (p. 8.2.5)	Результаты подбора армирования плиты (АСК): фоновая и дополнительная арматура (при необходимости) The results of the selection of slab reinforcement (GFRP): main and additional reinforcement (if necessary)	
				по результатам расчетов плиты по предельным состояниям при действии максимального изгибающего момента, возникающего в ее нормальных сечениях According to the results of slab calculations according to the limit states under the action of the maximum bending moment in its normal cross-sections					
				I группы ULS		II группы SLS			
				от действия расчетной полной нагрузки from the action of the design full load	от действия только постоянных и длительных расчетных нагрузок from the action of only constant and long-term design loads	от действия нормативной полной нагрузки from the action of the regulatory full load			
Вариант 3 (по СП 295.1325800.2017) Option 3 (according to CP 295.1325800.2017)	$R_{f,n} = 1000$ МПа; $E_f = 50$ ГПа; $R_f = 513,3$ МПа; $R_{fl} = 300$ МПа; $\bar{W}_{pl} = 1,3W_{red}$ $R_{f,n} = 1,000$ МПа; $E_f = 50$ ГПа; $R_f = 513,3$ МПа; $R_{fl} = 300$ МПа; $\bar{W}_{pl} = 1,3W_{red}$	Верх Top	611 мм ² , Ø13 мм, шаг 200 мм 611 мм ² , Ø13 мм, 200 mm pitch	866 мм ² , Ø15 мм, шаг 200 мм 866 мм ² , Ø15 мм, 200 mm pitch	– $(M_{cr} > M_{max})$	Ø16 мм, шаг 200 мм Ø16 mm, 200 mm pitch			
		Низ Bottom	1316 мм ² , Ø13 мм, шаг 200 мм + Ø13 мм, шаг 200 мм 1,316 мм ² , Ø13 мм, 200 mm pitch + Ø13mm, 200 mm pitch	1842 мм ² , Ø16 мм, шаг 200 мм + Ø16 мм, шаг 200 мм 1,842 мм ² , Ø16 мм, 200 mm pitch + Ø16 mm, 200 mm pitch	2833 мм ² , Ø16 мм, шаг 200 мм + Ø22 мм, шаг 200 мм 2,833 мм ² , Ø16 мм, 200 mm pitch + Ø22 mm, 200 mm pitch		Ø16 мм, шаг 200 мм + Ø22 мм, шаг 200 мм Ø16 mm, 200 mm pitch + Ø22 mm, 200 mm pitch		
Вариант 4 (по СП 295.1325800.2017 с Изменениями № 1) / Option 4 (according to CP 295.1325800.2017 with Amendment No. 1)	$R_{f,n} = 1150$ МПа; $E_f = 55$ ГПа; $R_f = 583,3$ МПа; $R_{fl} = 345$ МПа; $\bar{W}_{pl} = 1,68W_{red}$ $R_{f,n} = 1,150$ МПа; $E_f = 55$ ГПа; $R_f = 583,3$ МПа; $R_{fl} = 345$ МПа; $\bar{W}_{pl} = 1,68W_{red}$	Верх Top	532 мм ² , Ø12 мм, шаг 200 мм 532 мм ² , Ø12 мм, 200 mm pitch	753 мм ² , Ø14 мм, шаг 200 мм 753 мм ² , Ø14 мм, 200 mm pitch	– $(M_{cr} > M_{max})$	Ø16 мм, шаг 200 мм Ø16 mm, 200 mm pitch			
		Низ Bottom	1144 мм ² , Ø12 мм, шаг 200 мм + Ø12 мм, шаг 200 мм 1,144 мм ² , Ø12 мм, 200 mm pitch + Ø12 mm, 200 mm pitch	1602 мм ² , Ø15 мм, шаг 200 мм + Ø15 мм, шаг 200 мм 1,602 мм ² , Ø15 мм, 200 mm pitch + Ø15 mm, 200 mm pitch	1820 мм ² , Ø16 мм, шаг 200 мм + Ø16 мм, шаг 200 мм 1,820 мм ² , Ø16 мм, 200 mm pitch + Ø16 mm, 200 mm pitch		Ø16 мм, шаг 200 мм + Ø16 мм, шаг 200 мм Ø16 mm, 200 mm pitch + Ø16 mm, 200 mm pitch		

Примечание: в таблице приведены результаты подбора армирования фундаментной плиты с учетом ее геометрических параметров и максимальных значений изгибающего момента от действия внешних нагрузок; подбор арматуры по результатам расчета по 2-й группе предельных состояний осуществлен по критерию допустимой ширины продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин a_{cr} , равной 0,5 и 0,7 мм соответственно.

Notes: the table shows the results of the selection of the foundation slab reinforcement taking into account its geometric parameters and the maximum values of the bending moment from the action of external loads; the based on the SLS calculation results selection of reinforcement was carried out according to the criterion of the permissible width of long-term and short-term crack opening a_{cr} , equal to 0.5 and 0.7 mm, respectively.

нормальные трещины с шириной продолжительного раскрытия до 0,5 мм, что не превышает предельные значения по СП 295.1325800. В связи с чем в вариантах армирования 3 и 4 из конструктивного решения нижней зоны фундаментной плиты рекомендуется полностью заменить стальные элементы и детали на их аналоги из АСК.

Из табл. 2 можно отметить, что минимальные значения требуемой площади АСК получены по результатам расчетов по 1-й группе предельных состояний, среди которых наиболее неблагоприятные результаты соответствуют воздействию только постоянной и длительной расчетных нагрузок.

Подбор арматуры для рассматриваемой плиты осуществлен по максимальным значениям требуемой площади АСК, которым соответствуют результаты расчетов по 2-й группе предельных состояний.

При этом для незначительно нагруженных бетонных элементов без трещин преобладающим фактором при подборе АСК также могут являться конструктивные требования ($\mu_f \geq \mu_{f,min}$).

Комплексный учет всех особенностей АКП, развитие технологии ее производства (промышленное изготовление гнутых изделий из АКП); применение АКП с повышенными механическими характеристиками и их учет в расчетах, а также развитие нормативно-технической базы позволяют разрабатывать проекты фундаментных бетонных плит под многоэтажные здания с полной заменой стальной арматуры на АКП (табл. 3).

Из анализа табл. 3 возникает справедливый вопрос об экономической целесообразности производства бетонных фундаментов, армированных АКП. Оценка полного экономического эффекта

Табл. 3. Результаты подбора армирования фундаментной плиты для вариантов 1–4

Table 3. Results of the selection of the foundation slab reinforcement for options 1–4

Результаты подбора армирования фундаментной плиты с учетом результатов расчетов и конструктивных требований The results of the selection of foundation slab reinforcement taking into account the calculation results and design requirement				
Армирование Reinforcement	Вариант 1 (по проекту) Option 1 (by project)	Вариант 2 (по проекту) Option 2 (by project)	Вариант 3 Option 3	Вариант 4 Option 4
			$R_{f,n} = 1150$ МПа, $E_f = 55$ ГПа, $R_{f,n} = 1,150$ МПа, $E_f = 55$ GPa	$R_{f,n} = 1000$ МПа, $E_f = 50$ ГПа, $R_{f,n} = 1,000$ МПа, $E_f = 50$ GPa
	по СП 63.13330.2012 according to CP 63.13330.2012	по СП 63.13330.2012 (с Изменениями № 1) according to CP 63.13330.2012 (with Amendment No. 1)	по СП 295.1325800.2017 according to CP 295.1325800.2017	по СП 295.1325800.2017 (с Изменениями № 1) according to CP 295.1325800.2017 (with Amendment No. 1)
Фоновая арматура верхней зоны Main reinforcement of the upper zone	Ø20 A500C, шаг 200 Ø20 A500C, 200 pitch	Ø15 АСК, шаг 200 Ø15 GFRP, 200 pitch	Ø16 АСК, шаг 200 Ø16 GFRP, 200 pitch	Ø16 АСК, шаг 200 Ø16 GFRP, 200 pitch
Фоновая арматура нижней зоны Main reinforcement of the lower zone				
Гнутые элементы контура Bent contour elements		Ø20 А500С, шаг 200 Ø20 A500C, 200 pitch	Ø22 АСК, шаг 200 Ø22 GFRP, 200 pitch	
Дополнительная арматура нижней зоны Additional reinforcement of the lower zone				

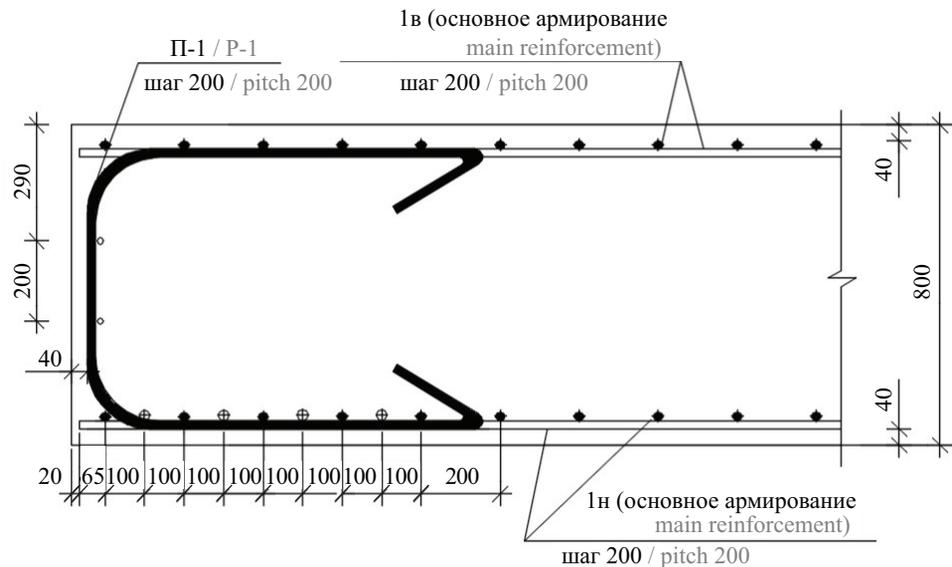


Рис. 7. Принципиальная схема армирования фундаментной плиты по проекту (варианты 1 и 2): 1н, 1в — фоновое армирование нижней и верхней зоны плиты соответственно; П-1 — изогнутый П-образный элемент арматуры

Fig. 7. Scheme of the foundation slab reinforcement according to the project (options 1 and 2): 1н, 1в — background reinforcement of the lower and upper zone of the slab, respectively; П-1 — curved П-shaped reinforcement element

от применения АКП взамен стальной арматуры является многофакторной задачей: условия строительства; стоимость строительных материалов; расходы на транспортировку и складирование; такелажные и монтажные работы; изменение технологических режимов строительства; возможность отказа от устройства гидроизоляции, увеличение межремонтного цикла и долговечности конструкции и прочее. На текущий момент в РФ отсутствуют утвержденные на государственном уровне подходы и инструменты (ЕНиР, ФЕР и прочее), объективно учитывающие все экономические аспекты применения АКП. Вопросы оценки экономических показателей в части применения АКП для армирования бетонных конструкций требуют исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принимая во внимание приведенные выше аспекты, возможно заключить следующее.

При рациональном подходе к процессам проектирования возможно разрабатывать проекты бетонных фундаментных плит на упругом основании с применением АКП, отвечающие требованиям нормативных документов по надежности. При этом имеется возможность полного исключения металлических элементов (арматуры, изделий, закладных деталей) в таких конструкциях, а также необходимости устройства гидроизоляции (при должном обосновании и контроле качества строительных работ).

Для обеспечения надежности изгибаемых бетонных конструкций с АКП, помимо прочих расчетов, следует также выполнять проверку по 1-й группе

предельных состояний при действии только постоянной и длительной расчетных нагрузок.

При подборе количества АКП и разработке схем расположения рабочей продольной арматуры следует соблюдать требование п. 6.1.3 СП 295.1325800 ($M_{ult} \geq 1,5M_{cre}$ при наличии трещин в сечении изгибаемой конструкции).

В случае назначения параметров армирования изгибаемых бетонных конструкций с АКП зачастую преобладающим фактором является соблюдение условий по 2-й группе предельных состояний. Для незначительно нагруженных конструкций определяющим фактором может становиться соблюдение конструктивных требований ($\mu_f \geq \mu_{f,min}$). Это зависит от геометрических параметров конструкции, характера ее работы, условий ее нагружения и опирания.

Учет положений Изменения № 1 к СП 295.1325800.2017 позволяет значительно повысить расчетные показатели трещиностойкости изгибаемых бетонных элементов. Это находит свое отражение в виде снижения требуемой площади арматуры по расчетам конструкции по 2-й группе предельных состояний.

При проектировании бетонных конструкций стоит уделять особое внимание выбору вида и свойств АКП. Рекомендуется применять АКП с механическими характеристиками, определенными с обеспеченностью не менее 0,95 по результатам испытаний в соответствии с ГОСТ 32492 и превышающими приведенные в ГОСТ 31938 минимальные значения.

Вопросы оценки экономической эффективности от применения АКП для армирования бетонных конструкций требуют комплексного подхода и соответствующих исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Falikman V.R., Rozentahl N.K., Stepanova V.F.* New Russian norms and codes on protection of building structures against corrosion // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. 2017. Pp. 2135–2143. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_244
2. *Тамразян А.Г.* Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18. EDN MGOLLW.
3. *Берлинов М.В., Берлинова М.Н.* Длительная эксплуатация железобетонной балки на грунтовом основании с учетом коррозионных повреждений // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 19–27. EDN KFAQUU.
4. *Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Степанов А.Ю.* Арматура композитная полимерная и композитные полимерные изделия. М. : ООО «Бумажник», 2023. 170 с. EDN GVCSCX.
5. *Степанова В.Ф., Степанов А.Ю., Жирков Е.П.* Арматура композитная полимерная. М., 2013. 200 с. EDN FTRSWT.
6. *Manalo A., Mutsuyoshi H., Nagamoto N., Murata M., Lapshinov A., Litvinov E.* FRP Reinforced Concrete Around the World, Part 2 Initiatives for acceptance and safe implementation: Australia, Japan, and Russian Federation // International Journal of Lightweight Concrete. 2022. Vol. 6. Pp. 47–53.
7. *Manalo A.C., Mendis P., Bai Y., Jachmann B., Sorbello C.D.* Fiber-reinforced polymer bars for concrete structures: state-of-the-practice in Australia // Journal of Composites for Construction. 2021. Vol. 25. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001105
8. *Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р.* Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 30–38. EDN ZWUFXJ.
9. *Наджибуллохи Р., Рахмонов А.Д.* Экспериментальное исследование работы бетонных конструкций, армированных неметаллической композитной арматурой // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2018. Т. 61. № 1. С. 71–77. EDN ZDLWSE.
10. *Латишинов А.Е.* Обследование и контроль качества конструкций армированных и усиленных композитными полимерными материалами // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : мат. VIII междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 129–135. EDN YQYBVG.
11. *Латишинов А.Е., Калашиников А.Ю.* Обследование технического состояния фундаментной плиты, армированной стеклокомпозитной арматурой, с помощью георадара // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : мат. IX науч.-практ. конф. 2018. С. 133–139. EDN YYXQQP.
12. *Kakusha V., Kornev O., Kovalev M., Lapshinov A., Litvinov E.* GFRP-reinforced foundation slab design for 15 story residential building // American Concrete Institute, ACI Special Publication. 2018. Vol. 326. EDN GMTEIN.
13. *Курлапов Д.В., Милютин Б.Г., Хабаров А.В.* Техническое обследование фундаментных плит, армированных композитной арматурой // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 69–73. EDN YSFCYU.
14. *Римшин В.И., Меркулов С.И.* О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 22–26. EDN VZDPWN.
15. *Ганзий Ю.В.* Идентификация опасностей получения некачественной продукции из полимерного композитного материала на примере строительной композитной арматуры // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 3. С. 13–19. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-13-19. EDN XZIBGX.
16. *Плевков В.С., Балдин И.В., Кудяков К.Л., Невский А.В.* Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5 (58). С. 91–101. EDN WVPXYT.
17. *Плевков В.С., Тамразян А.Г., Кудяков К.Л.* Прочность и трещиностойкость изгибаемых фибробетонных элементов с преднапряженной стеклокомпозитной арматурой при статическом и кратковременном динамическом нагружении : монография. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. 204 с. EDN PLFMCY.
18. *Кудяков А.И., Плевков В.С., Белов В.В., Невский А.В., Кудяков К.Л.* Технология и состав углеородофибробетона с повышенной однородностью прочностных показателей // Вопросы материаловедения. 2016. № 1 (85). С. 66–72. EDN WANUNL.
19. *Кудяков В.А., Кудяков А.И., Лукьянчиков С.А., Кудяков К.Л.* Управление технологическими процессами производства модифицированных бетонов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6 (65). С. 116–126. EDN ZWJBCF.
20. *Nevsky A., Kudyakov K., Danke I., Kudyakov A., Kudyakov V.* Improvement of cement concrete strength properties by carbon fiber additives // AIP Conference Proceedings. 2016. DOI: 10.1063/1.4937875
21. *Falikman V., Solovyov V., Nurtdinov M.* Mechanical properties and durability of FRC with glass-polymer composite fiber // FIB 2018 — Proceedings for

the 2018 fib Congress: Better, Smarter, Stronger. 2019. Pp. 2490–2500. EDN SZSFHL.

22. *Mukhamediev T.A., Falikman V.R.* Design of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures // Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV. 2015. Pp. 183–184. DOI: 10.1201/b18972-116

23. *Тамразян А.Г., Федорова Н.В.* Оценка надежности железобетонных конструкций, усиленных углепластиковым внешним армированием // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 6 (366). С. 226–231. EDN YRWXXF.

24. *Маилян Д.Р., Георгиев С.В.* К определению прогибов гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек, усиленных в поперечном направлении композитными материалами // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 32–41. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.2.32-41. EDN WQETQQ.

25. *Мухамедиев Т.А., Кузеванов Д.В.* К расчету по прочности изгибаемых конструкций из бетона с композитной полимерной арматурой // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 4 (267). С. 18–22. EDN WHMCOH.

26. *Мухамедиев Т.А.* К расчету конструкций из бетона с полимерной композитной арматурой // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 4 (27). С. 65–71. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-65-71. EDN SOQOZY.

27. *Мухамедиев Т.А.* Изменения в своде правил по проектированию конструкций из бетона с полимерной композитной арматурой // Вестник НИЦ Строительство. 2021. № 3 (30). С. 51–55. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(30)-51-55. EDN VIDGQT.

28. *Бегунова Н.В., Грахов В.П., Возмищев В.Н., Кислякова Ю.Г.* Сравнительная оценка результатов испытаний бетонных балок с композитной арматурой

и расчетных данных // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 2. С. 155–163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163. EDN ZBFCNL.

29. *Захиду М.З., Никулин А.И.* Определение трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов с применением преднапряженной композитной арматуры // Наука и инновации в строительстве : сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 59–64. EDN RIWAAE.

30. *Белуцкий И.Ю., Сим А.Д.* К оценке трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов, армированных композитной арматурой // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4 (43). С. 95–102. EDN YGJESN.

31. *Кузьмин Д.А., Ивасюк И.М., Тишков Е.В.* Сравнение изгибаемых бетонных элементов, армированных стальной и стеклопластиковой арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 35–40. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.35-40. EDN KVQRWN.

32. *Лапишинов А.Е., Борисов А.В.* Безопасность применения изгибаемых бетонных конструкций, армированных стеклокомпозитной арматурой // Композиты и наноструктуры. 2020. Т. 12. № 1 (45). С. 25–30. EDN FIYPDI.

33. *Ветрова О.А.* Экспериментальные исследования деформативности бетонных балок, армированных композитной арматурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 103–114. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-111. EDN KLKOCX.

34. *Антаков И.А.* Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой // Жилищное строительство. 2018. № 5. С. 15–18. EDN XQKXFB.

Поступила в редакцию 31 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 19 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Константин Львович Кудяков** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций; **Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»**; г. Москва, 109428, 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 5; доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26; РИНЦ ID: 778166, Scopus: 56487882600, ResearcherID: E-3400-2016, ORCID: 0000-0002-4786-3132; konst_k@mail.ru;

Андрей Викторович Бучкин — кандидат технических наук, заместитель заведующей лабораторией коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций; **Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»**; г. Москва, 109428, 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 5; РИНЦ ID: 859377, Scopus: 2148726351; andibuch@inbox.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Falikman V.R., Rozentahl N.K., Stepanova V.F. New Russian norms and codes on protection of building structures against corrosion. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. 2017; 2135-2143. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_244
2. Tamrazian A.G. Methodology for the analysis and assessment of the reliability of the state and prediction the service life of reinforced concrete structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 1(1):5-18. EDN MGOLLW. (rus.).
3. Berlinov M.V., Berlinova M.N. Long-term exploitation of a reinforced concrete beam on a ground base with corrosion damage. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 1(1):19-27. EDN KFAQUU. (rus.).
4. Stepanova V.F., Buchkin A.V., Khudyakov K.L., Stepanov A.Yu. *Composite polymer fittings and composite polymer products*. Moscow, LLC "Bumazhnik", 2023; 170. EDN GVCSCX. (rus.).
5. Stepanova V.F., Stepanov A.Yu., Zhirkov E.P. *Composite polymer reinforcement*. Moscow, 2013; 200. EDN FTRSWT. (rus.).
6. Manalo A., Mutsuyoshi H., Nagamoto N., Murata M., Lapshinov A., Litvinov E. FRP reinforced concrete around the world, Part 2 Initiatives for acceptance and safe implementation: Australia, Japan, and Russian Federation. *International Journal of Lightweight Concrete*. 2022; 6:47-53.
7. Manalo A.C., Mendis P., Bai Y., Jachmann B., Sorbello C.D. Fiber-reinforced polymer bars for concrete structures: state-of-the-practice in Australia. *Journal of Composites for Construction*. 2021; 25(1). DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001105
8. Khozin V.G., Gizdatullin A.R. Compatibility of polymer-composite reinforcement with cement concrete in structures. *Construction Materials*. 2017; 11:30-38. EDN ZWUFXJ. (rus.).
9. Najibullohi R., Rakhmonov A.D. Experimental investigation of concrete constructions armored of non-metallic composite armature. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2018; 61(1):71-77. EDN ZDLWSE. (rus.).
10. Lapshinov A.E. Inspection and quality control of reinforced and strengthened structures with FRP structures. *Survey of Buildings and Structures: problems and ways to solve them Materials : VIII International Scientific and practical conference*. 2017; 129-135. EDN YQYBVG. (rus.).
11. Lapshinov A.E., Kalashnikov A.Yu. The GPR inspection of foundation slab reinforced with GFRP bars. *Survey of buildings and structures: problems and ways Their solutions : IX International Scientific and Practical Conference 2018*. 2018; 133-139. EDN YYXQQP. (rus.).
12. Kakusha V., Kornev O., Kovalev M., Lapshinov A., Litvinov E. GFRP-Reinforced Foundation Slab Design for 15 Story Residential Building. *American Concrete Institute, ACI Special Publication*. 2018; 326. EDN GMTEIN.
13. Kurlapov D.V., Milutin B.G., Habarov A.V. Technical survey of foundation slabs reinforced with composite rebars. *Construction and Industrial Safety*. 2017; 9(61):69-73. EDN YSFCHY. (rus.).
14. Rimshin V.I., Merkulov S.I. About normalization of characteristics of rod non-metallic composite reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 5:22-26. EDN VZDPWN. (rus.).
15. Ganziy Yu.V. Danger identification of receiving the low-quality production from polymeric composite material on the example of constructive composite fittings. *Bulletin of Kalashnikov ISTU*. 2018; 21(3):13-19. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-13-19. EDN XZIBGX. (rus.).
16. Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudyakov K.L., Nevskii A.V. Strength and deformability of polymer composites under tensile and compressive loads. *Journal of Construction and Architecture*. 2016; 5(58):91-101. EDN WVPXYT. (rus.).
17. Plevkov V.S., Tamrazyan A.G., Kudyakov K.L. *Strength and crack resistance of bent fiber-concrete elements with prestressed glass composite reinforcement under static and short-term dynamic loading : monograph*. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2021; 204. EDN PLFMCY. (rus.).
18. Kudyakov A.I., Plevkov V.S., Belov V.V., Kudyakov K.L., Nevskii A.V. Technology and composition of carbon-fiber-reinforced concrete with high homogeneity of strength properties. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016; 1(85):66-72. EDN WANUNL. (rus.).
19. Kudyakov V.A., Kudyakov A.I., Lukyanchikov S.A., Kudyakov K.L. Industrial process control in modified concrete technology. *Journal of Construction and Architecture*. 2017; 6(65):116-126. EDN ZWJBCF. (rus.).
20. Nevsky A., Kudyakov K., Danke I., Kudyakov A., Kudyakov V. Improvement of cement concrete strength properties by carbon fiber additives. *AIP Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.1063/1.4937875
21. Falikman V., Solovyov V., Nurtdinov M. Mechanical properties and durability of FRC with glass-polymer composite fiber. *FIB 2018 — Proceedings for the 2018 fib Congress: Better, Smarter, Stronger*. 2019; 2490-2500. EDN SZSFHL.
22. Mukhamediev T.A., Falikman V.R. Design of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV*. 2015; 183-184. DOI: 10.1201/b18972-116
23. Tamrazyan A.G., Fedorova N.V. Reliability assessment of reinforced concrete structures, strengthening by external reinforcement with carbon fiber. *Proceedings of Higher Educational Institutions*. 2016; 6(366):226-231. EDN YRWXXF. (rus.).

24. Mailyan D.R., Georgiev S.V. To the definition the deflections of flexible non-centrally compressed reinforced concrete struts strengthened in the transverse direction with composite materials. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 2(2):32-41. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.2.32-41. EDN WQETQQ. (rus.).
25. Mukhamediev T.A., Kuzevanov D.V. On the calculation of the strength of bent structures made of concrete with composite reinforcement. *Construction mechanics and calculation of structures*. 2016; 4(267):18-22. EDN WHMCOH. (rus.).
26. Mukhamediyev T. To the calculation of concrete structures with polymer composite reinforcement. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020; 4(27):65-71. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-65-71. EDN SOQOZY. (rus.).
27. Mukhamediyev T. Changes in the code of rules for the design of structures made of concrete with polymer composite reinforcement. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021; 3(30):51-55. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(30)-51-55. EDN VIDGQT. (rus.).
28. Begunova N.V., Grahov V.P., Vozmishchev V.N., Kislyakova J.G. Comparative evaluation of results on test of concrete beams with fiberglass rebar and calculated data. *Science and Technology*. 2019; 18(2):155-163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163. EDN ZBFCNL. (rus.).
29. Zahidi M.Z., Nikulin A.I. Determination of crack resistance of bent reinforced concrete elements using prestressed composite reinforcement. *Science and Innovations in Construction : collection of reports of the III International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of V.G. Shukhov BSTU*. 2019; 59-64. EDN RIWAAE. (rus.).
30. Belutsky I.Yu., Sim A.D. Evaluation of fracture toughness of concrete flexural members reinforced by composite armature. *Bulletin of Pacific National University*. 2016; 4(43):95-102. EDN YGJESN. (rus.).
31. Kuzmin D.A., Ivasyuk I.M., Tishkov Ye.V. Comparative analysis of bending concrete elements reinforced with steel and fiber-glass reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 12:35-40. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.35-40. EDN KVQRWN. (rus.).
32. Lapshinov A.E., Borisov A.V. Safety under bending of concrete with glass-fibre composite reinforcement. *Composites and Nanostructures*. 2020; 12(1):25-30. EDN FIYPDI. (rus.).
33. Vetrova O.A. Pilot studies of concrete beams deformability reinforced with composite reinforcement. *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(1):103-114. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-111. EDN KLKOCX. (rus.).
34. Antakov I.A. Features of behavior of flexural members with composite polymeric reinforcement under load. *Housing Construction*. 2018; 5:15-18. EDN XQKXFB. (rus.).

Received August 31, 2023.

Adopted in revised form on October 19, 2023.

Approved for publication on December 14, 2023.

B I O N O T E S: **Konstantin L. Kudyakov** — Candidate of Technical Sciences, leading researcher at the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures; **Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after. A.A. Gvozdeva JSC “Research Center “Construction”**; 6 2 Institutaskaia st., Moscow, 109428, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 778166, Scopus: 56487882600, ResearcherID: E-3400-2016, ORCID: 0000-0002-4786-3132; konst_k@mail.ru;

Andrey V. Buchkin — Candidate of Technical Sciences, deputy head of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete structures; **Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after. A.A. Gvozdeva JSC “Research Center “Construction”**; 6 2 Institutaskaia st., Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 859377, Scopus: 2148726351; andibuch@inbox.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий

Сергей Гургенович Саиян, Александра Михайловна Ефимова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проводятся расчетные исследования аэродинамической интерференции Московского международного делового центра (ММДЦ) «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий с учетом их хронологического порядка. До настоящего момента для данного комплекса исследования аэродинамической интерференции выполнялись только для проектируемых зданий с учетом окружающей актуальной и перспективной застройки без расчетных исследований их влияния на уже построенные здания. На основе численного моделирования показана важность учета аэродинамической интерференции и сделаны выводы о взаимовлиянии высотных зданий, а также выявлены наиболее опасные углы атаки ветра, способствующие возникновению максимальных значений средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия.

Материалы и методы. Расчетный анализ осуществляется на основе методов численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent. Для расчетных исследований разработаны, верифицированы и валидированы квазидвухмерные аэродинамические модели комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити».

Результаты. Приведены результаты для 256 расчетных случаев, включающих 13 расчетных вариантов с последовательным возведением зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити» и 19 расчетов отдельностей высоток. Каждый расчет выполнялся для 8 направлений атаки ветра. В качестве результатов приводятся средние и пульсационные суммарные аэродинамические силы и моменты в зависимости от хронологии возведения сооружений для каждого из зданий комплекса. Определены наиболее опасные направления ветра на основе построенных лепестковых диаграмм аэродинамических коэффициентов (средних и пульсационных) в зависимости от количества возведенных зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити».

Выводы. На примере последовательного возведения комплекса ММДЦ «Москва-Сити» показана важность учета аэродинамической интерференции в условиях плотной и изменяющейся городской застройки как для новых, так и уже построенных зданий. Аэродинамическая интерференция приводит к эффектам ветрового экранирования и усилению ветра, что влияет на механическую безопасность зданий и сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: CFD-моделирование, ветровые воздействия, аэродинамика зданий и сооружений, высотные здания, аэродинамическая интерференция, ММДЦ «Москва-Сити»

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саиян С.Г., Ефимова А.М. Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941

Автор, ответственный за переписку: Сергей Гургенович Саиян, berformert@gmail.com.

Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings

Sergey G. Saiyan, Alexandra M. Efimova

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

ABSTRACT

Introduction. Computational studies of aerodynamic interference of the MIBC “Moscow-City” complex with sequential construction of buildings, taking into account their chronological order are carried out. Previous studies only considered the designed buildings and structures, along with the surrounding actual and future development, without computational analysis of their impact on the already constructed buildings. The study demonstrates the importance of considering aerodynamic interference in numerical simulation. It draws conclusions on the mutual influence of high-rise buildings and identifies the wind attack angles that contribute to the maximum values of the average and pulsation components of the wind action.

Materials and methods. Numerical simulation methods in the ANSYS Fluent software package were used to conduct computational analysis. Quasi-two-dimensional aerodynamic models of the building complex of MIBC “Moscow-City” were developed, verified and validated for the computational studies.

Results. The paper presents the results of 256 design cases, including 13 design variants for the consecutive erection of buildings in the MIBC “Moscow-City” complex and 19 calculations of freestanding high-rise buildings. Each calculation was performed for eight wind attack directions. The paper provides the average and pulsation total aerodynamic forces and moments for each building of the complex, depending on the chronology of building construction. The radar charts of aerodynamic coefficients (average and pulsation) were used to determine the most dangerous wind directions. The number of constructed buildings in the MIBC “Moscow-City” complex was taken into account.

Conclusions. Based on the example of the sequential construction of the MIBC “Moscow-City” complex, this study emphasizes the importance of considering aerodynamic interference in dense and changing urban environments for both new and existing buildings. Aerodynamic interference can result in both wind shielding effects and increased wind, which affects the mechanical safety of buildings and structures.

KEYWORDS: CFD modelling, wind action, aerodynamics of buildings and constructions, high-rise buildings, aerodynamic interference, MIBC “Moscow-City”

FOR CITATION: Saiyan S.G., Efimova A.M. Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):906-941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941 (rus.).

Corresponding author: Sergey G. Saiyan, berformert@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Темпы высотного строительства с каждым годом неуклонно растут, также увеличивается и максимальная высота зданий. Возникает потребность во внедрении перспективных зданий в существующую городскую застройку, что приводит к изменению аэродинамической ситуации окружающих сооружений [1]. Перераспределение воздушного потока в результате возведения новых зданий тесно связано с интерференционным эффектом, представленным на рис. 1.

С развитием комплексного высотного строительства предметом многочисленных аэродинамических исследований все чаще становится аэродинамическая интерференция [5–8]. Аэродинамическая интерференция — явление взаимного влияния сооружений за счет их обтекания ветровым потоком [9]. Актуальна задача прогнозирования взаимодействия воздушных потоков как на перспективные, так и на уже построенные здания. Пренебрежение исследованиями аэродинамической интерференции может привести к пагубным последствиям с точки зрения механической безопасности и комфорта людей. Не-

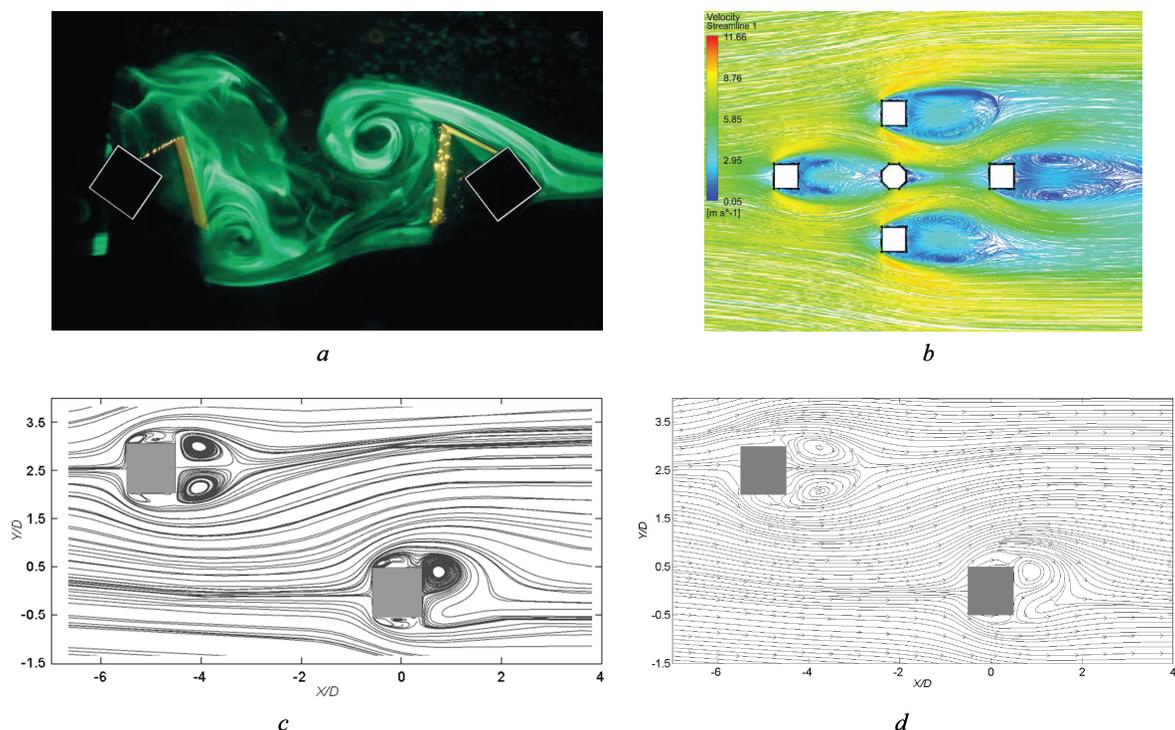


Рис. 1. Визуализация влияния периодических вихревых структур на здание, расположенное в аэродинамическом следе (a) [2]; линии тока при угле атаки ветра 0° (b) [3]; усредненные по времени линии тока на средней высоте: результат LES-моделирования (c) и результат эксперимента в аэродинамической трубе (d) [4]

Fig. 1. Visualization of the effect of periodic vortex structures on a building located in an aerodynamic trace (a) [2]; streamlines at wind angle of attack 0° (b) [3]; time-averaged streamlines at mid-height: LES result (c) and wind tunnel result (d) [4]



а



б

Рис. 2. Разрушение градирен электростанции в Феррибридже из-за срывов вихрей при скорости ветра 36 м/с (а) [2]; Bridgewater Place ускоряет ветер, поступающий с западного направления, а также создает нисходящий воздушный поток от жилого дома (б)¹

Fig. 2. Destruction of cooling towers at Ferrybridge Power Station due to vortex disruption at wind speeds of 36 m/s winds (a) [2]; Bridgewater Place accelerates wind coming from a westward direction and also creates a downward airflow from the residential building (b)¹

которые из примеров таких воздействий показаны на рис. 2.

Существует 4 основных подхода для определения ветровых нагрузок и воздействий на здания и сооружения:

- инженерные нормативно-аналитические методики (СП, Eurocode и т.д.)²;
- испытания в аэродинамической трубе (АДТ)^{3, 4, 5, 6} [10–17];
- математическое и численное (CFD) моделирование (в программных комплексах ANSYS Fluent/CFX, STAR CCM+, COMSOL Multiphysics, FlowVision, ЛОГОС Аэро-Гидро, OpenFOAM и т.д.) [3, 4, 14, 15];
- реальные замеры и мониторинг [18–20].

Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Использование нормативных подходов ограничено расчетами нагрузок только для простых форм зданий без учета возможных вариантов

¹ Как просчет инженеров привел к тому, что вокруг небоскреба закручиваются ветряные вихри // Novate.ru. URL: <https://novate.ru/blogs/171220/57077/>

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М.: Стандартинформ, 2017. 104 с.; Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions.

³ Каталог уникальных и высотных зданий и сооружений в аэродинамической трубе // Научно-исследовательская и проектно-строительная Фирма «УНИКОН». Новосибирск, 2015. 63 с.

⁴ Исследование ветровой нагрузки на фасад комплекса «Федерация» RWDI. Заключительный отчет. RWDI, 2005.

⁵ Комплекс «Федерация». Назначение расчетных нагрузок. ЦНИИСК им. Кучеренко, 2006.

⁶ Опыт расчетных исследований и решения задач строительной аэрогидродинамики. М., 2018. 15 с.

расположения высотного сооружения в городской застройке (эффект аэродинамической интерференции), а также рельефа местности. Физическое (экспериментальное) моделирование в АДТ требует большого количества временных ресурсов и финансовых затрат, также оно сопряжено с ограничением при выборе количества датчиков мониторинга давления, сложной и трудоемкой организацией, обработкой, анализом и интерпретацией результатов. Одновременно с этими особенностями проблемой для модельных испытаний является соблюдение полного подобия, что нереализуемо в практических задачах строительства из-за высоких чисел Рейнольдса (обычно для задач строительства $Re \sim 10^5 - 10^8$). Часто при испытаниях допускают отличие числа Рейнольдса на два-три порядка. Математическое (численное) моделирование дает возможность рассчитать любые характеристики ветрового воздействия на здания и сооружения, а также задать условия, трудновоспроизводимые в условиях эксперимента.

Для прогнозирования аэродинамики зданий и сооружений целесообразно использовать комплексный подход (численное моделирование + модельный эксперимент) [12, 13], позволяющий исключить все возможные расхождения и прийти к наиболее достоверной картине ветровых воздействий. Такой метод применяется в мировой практике ведущих научных организаций и аэродинамических труб, а в России для задач строительства реализуется на базе подразделений Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова и Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций

в НИУ МГСУ [14, 15], а также Научно-исследовательского центра «СтаДиО».

В России высотное строительство сконцентрировано в крупных промышленно-экономических центрах, один из них — г. Москва. В столице основная часть небоскребов сосредоточена на территории Пресненской набережной, где располагается Московский международный деловой центр (ММДЦ) «Москва-Сити».

ММДЦ «Москва-Сити» представляет собой комплекс высотных зданий, строительство которых началось с середины 1990-х гг. (рис. 3). Процесс возведения новых небоскребов осуществляется с цикличностью раз в 1–3 года⁷, что приводит к изменению ветрового воздействия на уже построенные здания. При внедрении нового сооружения оно может оказывать с точки зрения аэродинамики как положительное, так и негативное влияние на существующие здания. Расчет ветрового воздействия на проектируемые здания и сооружения, как правило, выполняется с учетом окружающей застройки

⁷ Москва-Сити. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Москва-Сити>

(рис. 4), однако аэродинамическими исследованиями уже построенных зданий пренебрегают. Влияние аэродинамической интерференции необходимо учитывать как для новых, так и близстоящих построек для обеспечения продолжительной эксплуатации и пригодности зданий.

В настоящем исследовании рассматривается влияние последовательного возведения зданий на аэродинамическую интерференцию комплекса ММДЦ «Москва-Сити». Для этого проводилось CFD-моделирование в квазидвухмерной нестационарной постановке для 8 углов атаки ветра (с шагом 45°) для отдельностоящих и групп высотных сооружений с учетом последовательного возведения зданий ММДЦ «Москва-Сити» в хронологическом порядке. На основе численного моделирования сделаны выводы о взаимовлиянии высотных зданий, а также выявлены наиболее опасные углы атаки ветра, способствующие возникновению максимальных значений средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия, влияющих на механическую безопасность зданий и сооружений.



Рис. 3. ММДЦ «Москва-Сити», 2023 г.³

Fig. 3. MIBC “Moscow-City”, 2023³



a



b



c



d



e



f

Рис. 4. Экспериментальная модель: *a* — ММДЦ «Москва-Сити» для испытаний в аэродинамической трубе 3-АТ-17.5/3 ООО «Фирма УНИКОН»³; *b* — небоскреба «Федерация» в АДТ RWDI (Канада)^{4,5} [10]; *c* — комплекса «Neva Towers» в АДТ RWDI (Канада) [11]; *d* — небоскреба «Федерация» для испытаний в аэродинамической трубе 3-АТ-17.5/3 ООО «Фирма УНИКОН»³; *e* — ММДЦ «Москва-Сити» для испытаний в БИГАТ НИУ МГСУ⁶ [12]; *f* — комплекса «Эволюция» в АДТ ВМТ (Великобритания) [13–17]

Fig. 4. Experimental model: *a* — MIBC “Moscow-City” for 3-AT-17.5/3 wind tunnel studies of UNICON Ltd.³; *b* — “Federation Tower” in the RWDI wind tunnel (Canada)^{4,5} [10]; *c* — “Neva Towers” in the RWDI wind tunnel (Canada) [11]; *d* — “Federation Tower” for 3-AT-17.5/3 wind tunnel studies of UNICON Ltd.³; *e* — MIBC “Moscow-City” for Large Research Gradient Wind Tunnel studies of NRU MGSU⁶ [12]; *f* — “Evolution Tower” in the BMT wind tunnel (UK) [13–17]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании рассмотрено 256 расчетных случаев (32 расчетных варианта × 8 углов атаки). Из них 13 расчетных вариантов описывают порядок построения высотных зданий комплекса

ММДЦ «Москва-Сити». Первым расчетным случаем является совокупность комплексов «Башня на Набережной» и «Федерация: Запад», замыкающий 13-й расчет включает 14 комплексов ММДЦ «Москва-Сити», начиная «Башней на Набережной»,

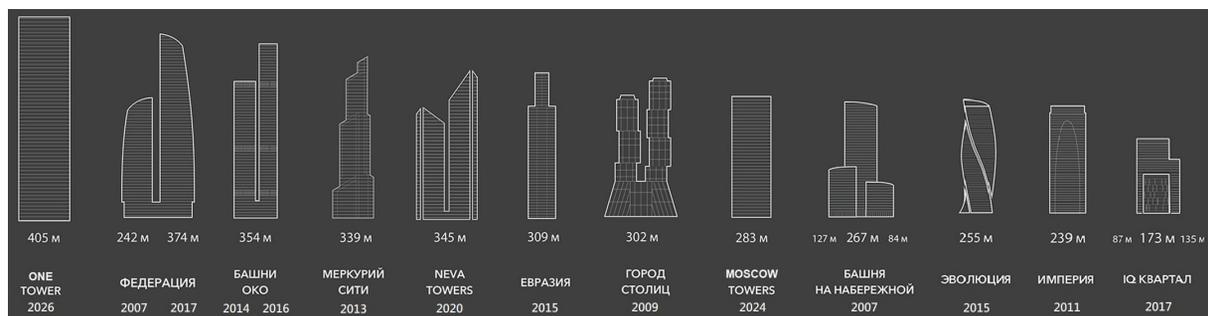


Рис. 5. Исследуемые объекты ММДЦ «Москва-Сити» с последовательностью их возведения⁸

Fig. 5. Investigated objects of the MIBC “Moscow-City” with construction sequence⁸

⁸ Московский международный деловой центр «Москва-Сити» // Градостроительный комплекс Москвы. URL: <https://stroj.mos.ru/infographics/moskovskii-miezhdu-narodnyi-dielovoi-tsentr-moskva-siti>

возведенной в 2007 г., заканчивая перспективным проектом «One Tower», конец строительства которого намечается в 2026 г. Остальные 19 расчетных случаев — это отдельностоящие высотные здания комплекса «Москва-Сити», для которых проводилось CFD-моделирование без учета окружающей застройки. Данные результаты использовались в качестве референсных значений для сравнения. Хронология строительства проекта ММДЦ «Москва-Сити» показана на рис. 5.

На рис. 6 приведена трехмерная геометрическая модель ММДЦ «Москва-Сити» в ANSYS SpaceClaim, а также плоские сечения на высоте 120 м с указанием хронологии возведения, которые рассматривались в рамках настоящей статьи.

Вычислительная гидрогазодинамика (CFD) реализует методы численного моделирования для решения задач, связанных с течениями жидкостей и газов. Моделирование ветровых потоков и воздействий на здания и сооружения сводится в общем случае к численному решению системы трехмерных нестационарных нелинейных уравнений Навье – Стокса.

В практических задачах определения ветровых нагрузок и воздействий на здания и сооружения с обоснованным упрощением ветровые потоки принимаются несжимаемыми ($\rho = \text{const}$) и изотермическими ($T = \text{const}$) а внешние массовые силы не учитываются. Тогда нестационарные нелинейные уравнения гидрогазодинамики примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u_x; \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta u_y; \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta u_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_x, u_y, u_z — компоненты вектора скорости потока \vec{u} , м/с; t — время, с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; p — давление, Па; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — дифференциальный оператор Лапласа.

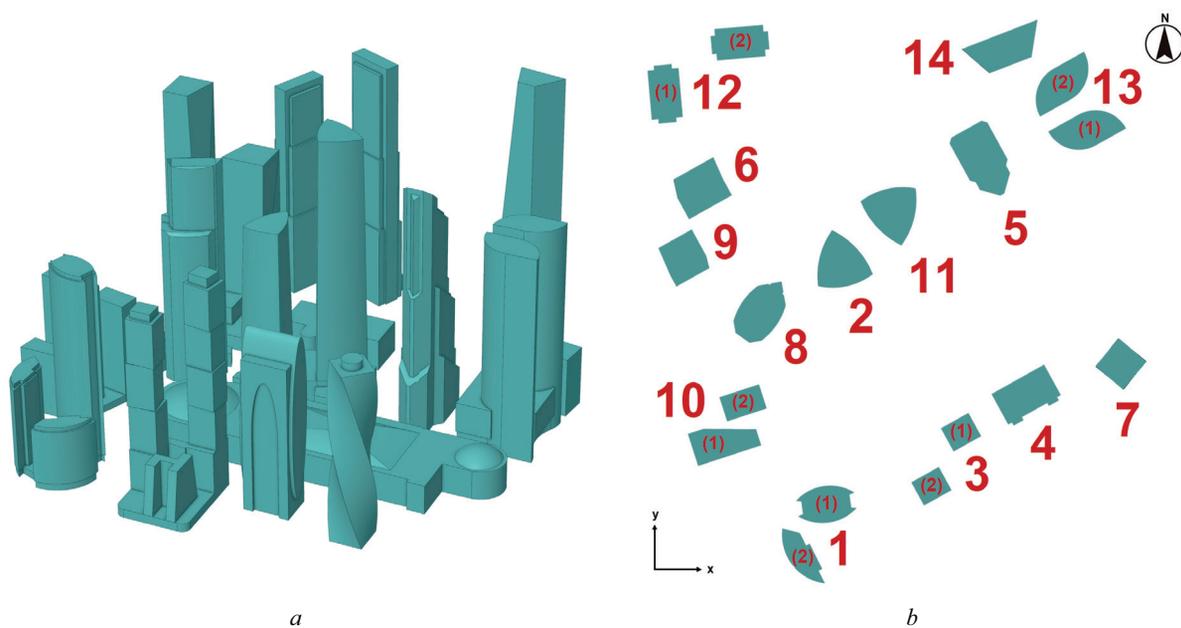


Рис. 6. Геометрическая модель ММДЦ «Москва-Сити» в ANSYS SpaceClaim: *a* — трехмерная модель; *b* — плоские сечения на высоте 120 м; хронология возведения зданий: 1 (1) — «Башня на Набережной: С»; 1 (2) — «Башня на Набережной: В»; 2 — «Федерация: Запад»; 3 (1) — «Город столиц: Москва»; 3 (2) — «Город столиц: Санкт-Петербург»; 4 — «Империя»; 5 — «Меркурий»; 6 — «ОКО: Северная башня»; 7 — «Эволюция»; 8 — «Евразия»; 9 — «ОКО: Южная башня»; 10 (1) — «IQ-квартал: Башня 3»; 10 (2) — «IQ-квартал: Башня 2»; 11 — «Федерация: Восток»; 12 (1) — «Neva Towers: Башня 1»; 12 (2) — «Neva Towers: Башня 2»; 13 (1) — «Moscow Towers: Башня 1»; 13 (2) — «Moscow Towers: Башня 2»; 14 — «One Tower»

Fig. 6. Geometric model of the MIBC “Moscow-City” in ANSYS SpaceClaim: *a* — 3D model; *b* — 2D model of plane sections at a height of 120 meters; building construction timeline: 1 (1) — “Naberezhnaya Tower: C”; 1 (2) — “Naberezhnaya Tower: B”; 2 — “Federation Tower: West”; 3 (1) — “City of Capitals: Moscow”; 3 (2) — “City of Capitals: Saint-Petersburg”; 4 — “Imperia Tower”; 5 — “Mercury City Tower”; 6 — “OKO: North Tower”; 7 — “Evolution Tower”; 8 — “Eurasia Tower”; 9 — “OKO: South Tower”; 10 (1) — “IQ-quarter: Tower 3”; 10 (2) — “IQ-quarter: Tower 2”; 11 — “Federation Tower: East”; 12 (1) — “Neva Towers: Case 1”; 12 (2) — “Neva Towers: Case 2”; 13 (1) — “Moscow Towers: Case 1”; 13 (2) — “Moscow Towers: Case 2”; 14 — “One Tower”

Также необходимо выполнение уравнений неразрывности и состояния:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\rho = \text{const}. \quad (3)$$

Численное решение систем уравнений (1)–(3) с учетом начальных и граничных условий реализуется за счет моделирования турбулентности, для которого выделяют 4 основных подхода:

1. DNS (Direct Numerical Simulation) — прямое численное моделирование. Система гидрогазодинамических уравнений (1)–(3) разрешается напрямую для всех масштабов турбулентности. Данный подход требует чрезвычайно больших вычислительных ресурсов (разрешение должно происходить до уровня колмогоровских масштабов турбулентности и времени жизни «малых» вихрей). При современных возможностях ЭВМ метод реализуем только для очень малых скоростей потока (малых чисел Рейнольдса) и для исследовательских задач с использованием суперкомпьютеров.

2. LES (Large Eddy Simulation) — моделирование крупных вихрей. В этом подходе заложено применение осреднения по пространству уравнений Навье – Стокса. Реализация осреднения происходит через неявный фильтр, позволяющий отделить «крупные» вихри от «мелких», которыми обычно являются размеры ячейки (сетки), совокупность данных ячеек (конечных объемов) составляет конечно-объемную сетку. Вихри, превышающие размер конечного объема, разрешаются напрямую, остальные вихревые структуры моделируются на уровне подсеточной модели турбулентности.

3. URANS/RANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier – Stokes) — осредненные по Рейнольдсу (осредненные по времени) уравнения Навье – Стокса. Метод основан на представлении скорости потока в виде суммы осредненной и пульсационной составляющих. В связи с этим в уравнениях Навье – Стокса появляются дополнительные сдвиговые напряжения — 6 неизвестных, которые нужно определить. Замыкание уравнений Рейнольдса (определение турбулентных напряжений ($\tau_{ij}^T = \rho \overline{u'_i u'_j}$)) производится с помощью полуэмпирических моделей турбулентности. В RANS подходе все турбулентные вихри моделируются, т.е. не происходит их явного разрешения как в DNS и LES подходах.

4. Совокупность двух последних подходов, описывающих турбулентные течения, образует целый пласт моделей, объединяющих преимущества моделей LES (высокая точность расчета отрывных течений) и RANS (высокая точность расчета пристенных течений при скромных требованиях к сетке). Такие модели турбулентности называются гибридными.

В настоящей работе используется гибридная модель турбулентности SBES⁹ (моделирование вихрей со смешанным напряжением). Комбинирование двух моделей дает возможность достаточно точно предсказывать осредненные и пульсационные характеристики не только в зонах отрывных, но и присоединенных турбулентных течений при высоких числах Рейнольдса с использованием доступных сегодня вычислительных ресурсов. Переход между RANS и LES подходами для модели турбулентности SBES осуществляется с помощью функции переключателя f_S :

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^{SBES} &= f_S \cdot \tau_{ij}^{RANS} + (1 - f_S) \cdot \tau_{ij}^{LES}; \\ \mu_t^{SBES} &= f_S \cdot \mu_t^{RANS} + (1 - f_S) \cdot \mu_t^{LES}, \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_{ij}^{RANS} , τ_{ij}^{LES} — тензор напряжений (RANS/LES), Па; μ_t^{RANS} , μ_t^{LES} — турбулентная вязкость (RANS/LES), Па·с.

Для исследования явления аэродинамической интерференции необходимо корректно рассчитать ветровую нагрузку на сооружения, а также учесть перераспределение ветрового потока после его взаимодействия со зданиями. Модель турбулентности SBES разрешает крупные энергонесущие турбулентные структуры в свободном потоке с подсеточной моделью LES-WALE и описывает пристеночное течение RANS подходом.

ANSYS Fluent использует в качестве численного решения метод конечных (контрольных) объемов (МКО) для преобразования скалярного уравнения переноса (5) в алгебраическое (6), которое может быть решено численно:

$$\begin{aligned} \underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV}_{\text{нестационарность}} + \underbrace{\oint_A \rho \varphi \vec{u} \cdot d\vec{A}}_{\text{конвекция}} &= \\ = \underbrace{\oint_A \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A}}_{\text{диффузия}} + \underbrace{\int_V S_\varphi dV}_{\text{генерация}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где φ — искомая скалярная величина; V — объем ячейки, м³; \vec{u} — вектор скорости ($= u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$), м/с; \vec{A} — вектор площади поверхности ячейки, м²; Γ_φ — коэффициент диффузии для φ ; $\vec{\nabla} \varphi$ — градиент искомой величины $\varphi \left(= \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right)$; S_φ — массовые силы или источник.

Метод конечных объемов заключается в представлении законов сохранения (массы, импульса и энергии) в интегральной форме. Расчетная область с помощью сетки разбивается на совокупность конечных объемов. Узлы, в которых ищется решение, находятся в центрах контрольных объемов. После интегрирования уравнения переноса (5) по каждому

⁹ ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc. Canonsburg, 2020.

конечному объему получается дискретное уравнение (6), выражающее локальный закон сохранения:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{u}_f \varphi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot \vec{A}_f + S_\varphi V_{\text{cell}}, \quad (6)$$

где N_{faces} — количество граней, образующих конечный объем; φ_f — величина φ , конвектирующая через поверхность; $\rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f$ — массовый поток через поверхность; \vec{A}_f — вектор площади поверхности f , $|\vec{A}| (= |A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k}|)$; $\nabla \varphi_f$ — градиент φ на поверхности f .

Разработка конечно-объемной сетки для расчетных вариантов осуществлялась в ANSYS Meshing. В табл. 1, 2 приведены параметры конечно-объемных сеток, используемых для CFD-моделирования. Размерность конечно-объемных моделей составляет ~210 тыс. ячеек (внешняя область ~51 тыс., внутренняя область ~149–159 тыс.). Конечно-объемные

сетки показаны на рис. 7. Параметры конечно-объемной сетки выбраны на основе верификационного исследования, описанного далее в настоящей статье.

Все расчеты выполнены в квазидвухмерной нестационарной постановке с параметрами, представленными в табл. 3. Выбор квазидвухмерной постановки расчетных исследований обусловлен большой вычислительной сложностью трехмерного нестационарного CFD-моделирования для 256 расчетных случаев. Рассматриваемые здания имеют высоту, намного большую их поперечных размеров, что позволяет принимать эту постановку. Для наиболее опасных углов атаки, реализующих наибольшие ветровые воздействия, возможны уточняющие трехмерные расчеты.

Расчетная область с указанными граничными и начальными условиями, а также параметрами численного моделирования для аэродинамических

Табл. 1. Параметры для генерации сетки во внешней расчетной области (рис. 7, а)

Table 1. Parameters for mesh generation in the external computational domain (fig. 7, a)

Параметр Parameter	Значение Value	
Размер элементов конечнообъемной сетки Size of the finite volume mesh elements	В прямоугольном объеме In a rectangular volume	15 м / м
	На поверхности полуокружности inlet On the surface of the inlet semicircle	2 м / м
	На поверхности полуокружности outlet On the surface of the outlet semicircle	4 м / м
	По направлению оси OZ In the direction along the axis OZ	1 конечный объем 1 finite volume
Метод генерации Generation method	MultiZone с гексаэдрической сеткой и заданным минимальным размером ребра MultiZone with hexahedral mesh and specified minimum edge size	3 м / м

Табл. 2. Параметры для генерации сетки во внутренней расчетной области (рис. 7, б)

Table 2. Parameters for mesh generation in the internal computational domain (fig. 7, b)

Параметр Parameter	Значение Value	
Размер элементов конечнообъемной сетки Size of the finite volume mesh elements	В цилиндрическом объеме In a cylindrical volume	2 м / м
	На поверхности объектов On the surface of objects	2 м / м
	По направлению оси OZ In the direction along the axis OZ	1 конечный объем 1 finite volume
Пограничный слой Boundary layer	Плавный переход Smooth Transition	Коэффициент перехода — 0,5 Transition Ratio — 0.5 Максимальное количество слоев — 5 Maximum Layers — 5 Скорость роста — 1,2 Growth Rate — 1.2
Метод генерации Generation method	MultiZone с гексаэдрической сеткой и заданным минимальным размером ребра MultiZone with hexahedral mesh and specified minimum edge size	3 м / м

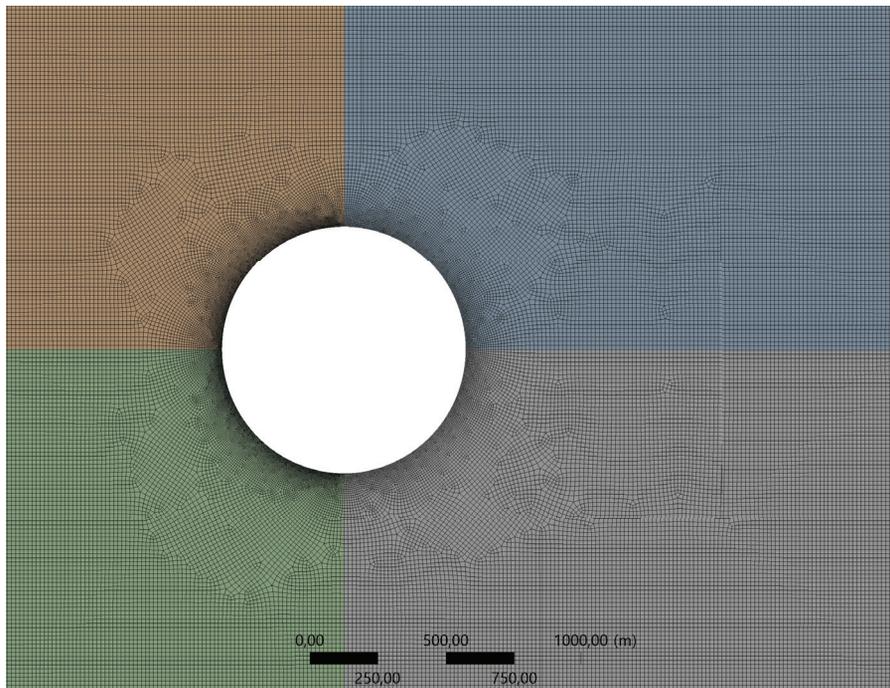
исследований комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити» показана на рис. 8.

При проведении нестационарных аэродинамических расчетов одним из ключевых параметров является временной шаг. Определение необходимого шага по времени, обеспечивающего быстрое получение результатов и при этом достаточного для моделирования вихреобразования вследствие турбулентности потока, обычно осуществляется по одному из двух подходов:

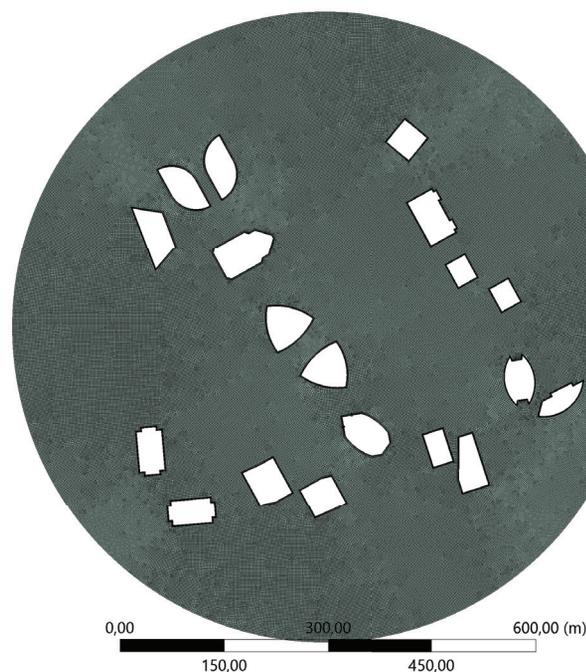
1. Шаг временной дискретизации может быть выбран исходя из необходимости отслеживания,

по крайней мере, 10–20 точек для наивысшей частоты возбуждения отклика, например, суммарной аэродинамической силы или на основе числа Струхала, представляющего безразмерную величину частоты срыва вихрей для оценки резонансных явлений.

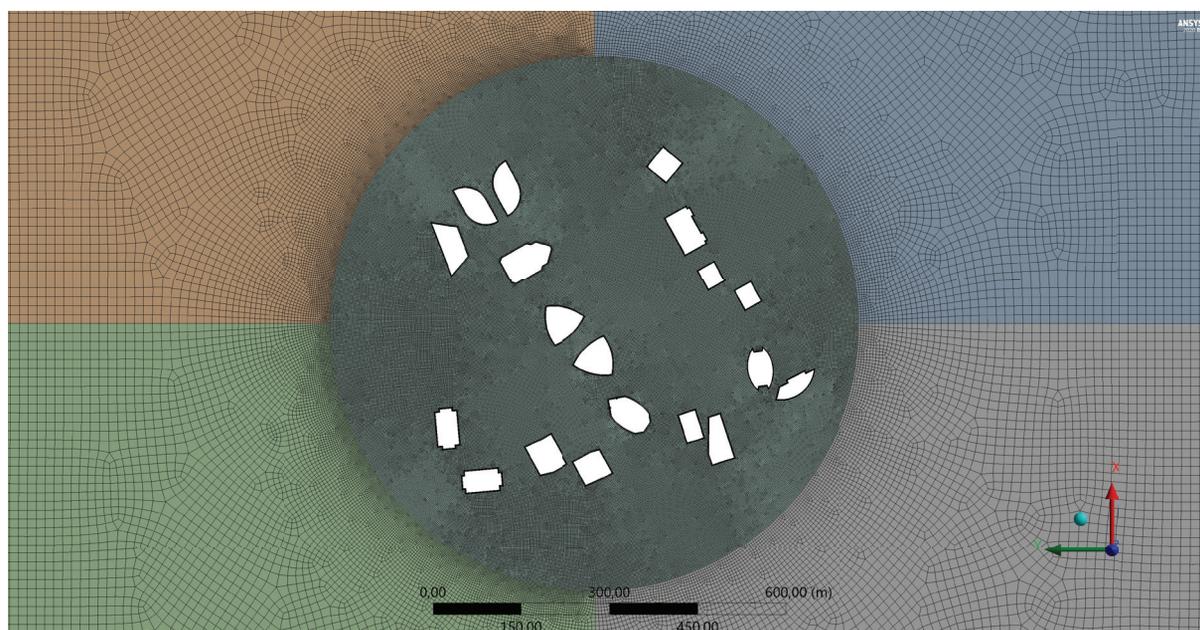
2. Назначение шага по времени возможно исходя из выполнения критерия Куранта – Фридрихса – Леви (CFL). При использовании явных схем интегрирования уравнений должно обеспечиваться выполнение критерия $CFL < 1$, при применении неявных схем допустимы значения $CLF = 3–10$.



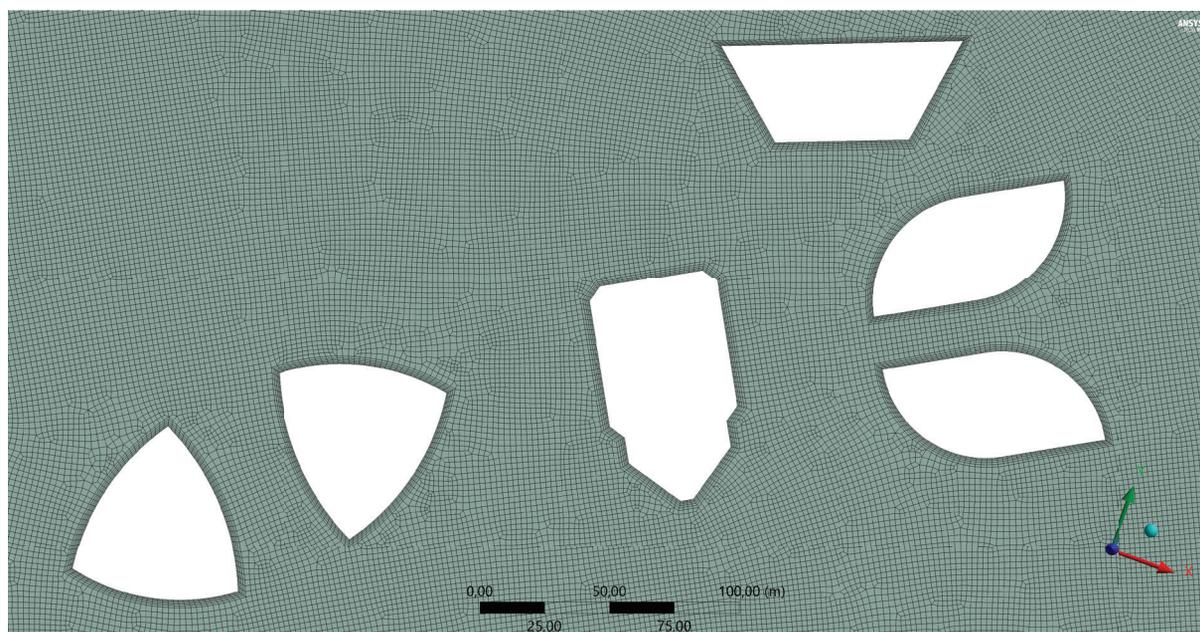
a



b



c



d

Рис. 7. Разработанные конечно-объемные сетки в ANSYS Meshing

Fig. 7. Developed finite-volume meshes in ANSYS Meshing

Общее физическое время моделирования назначено исходя из полного прохождения волны через расчетную область и дополнительного времени, необходимого для того, чтобы процесс приобрел установившийся характер. Средняя скорость на Inlet составляет 30 м/с, продольный размер расчетной области 3300 м.

Пространственная дискретизация конвективных членов достигается за счет аппроксимации второго порядка кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии. Для импульса используется ограниченная центрально-разностная схема. Способ оценки градиентов основан на ме-

тоде наименьших квадратов между двумя значениями в центрах соседних ячеек. Градиент давления вычисляется по схеме второго порядка. Временная дискретизация проводится ограниченной неявной схемой второго порядка.

По результатам расчетных исследований вычисляются значения средней \pm пульсационной составляющей ветрового воздействия. За среднее значение принимается среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad (7)$$

Табл. 3. Параметры CFD-моделирования

Table 3. CFD modelling parameters

Параметр Parameter	Описание Description
Размер расчетной области Domain size	<p>Внешняя (прямоугольная) — $2500 \times 3300 \times 3$ м ($x \times y \times z$) External (rectangular) — $2,500 \times 3,300 \times 3$ m ($x \times y \times z$) Внутренняя (цилиндрическая) — $R = 450$ м, $h = 3$ м Internal (cylindrical) — $R = 450$ m, $h = 3$ m</p>
Граничные условия Boundary conditions	<p>Граничные условия для всех расчетов одинаковы (рис. 9): The boundary conditions for all calculations are the same (fig. 9): <i>На входе (Inlet):</i> Inlet: $\frac{dp}{dn} = 0$, $u_n = 30$ м/с, принятая на высоте 120 м для первого ветрового района типа местности В, согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»; $u_\tau = 0$ $\frac{dp}{dn} = 0$, $u_n = 30$ m/s, adopted at a height of 120 m for the first wind area of terrain type B, according to SP 20.13330.2016 “Loads and Impacts”; $u_\tau = 0$, $\frac{dp}{dn} = 0$, $u_n = 30$ m/s Интенсивность турбулентности $I = 1$ % характерный размер вихря $l = 300$ м приняты согласно Еврокоду Turbulence intensity $I = 1$ % characteristic vortex size $l = 300$ m are accepted, according to Eurocode <i>На выходе (Outlet), в том числе турбулентные параметры для обратных потоков:</i> Outlet, including turbulence parameters for return flows: $\frac{du_n}{dn} = 0$, $I = 1$ %, $l = 300$ м $\frac{du_n}{dn} = 0$, $I = 1$ %, $l = 300$ m Условие симметрии потока (<i>Symmetry</i>) задано для верхней, нижней и боковых границ расчетной области: The symmetry condition for flow is applied to the upper, lower and lateral boundaries of the computational domain: $\frac{du_n}{dn} = 0$, $u_n = 0$, $\frac{du_\tau}{dn} = 0$ Условие стенки без проскальзывания (<i>no slip wall</i>) назначено на поверхности исследуемых объектов: The no-slip wall condition is assigned on the surface of the investigated objects: $u_n = 0$, $u_\tau = 0$, $\frac{dp}{dn} = 0$</p>
Начальные условия Initial conditions	<p>Гибридная инициализация (ANSYS Fluent) Hybrid Initialization (ANSYS Fluent) Поле скорости: $\nabla^2 \varphi = 0$, φ — потенциал скорости. Velocity Field: $\nabla^2 \varphi = 0$, φ — velocity potential. Условие на стенке: $\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{стенка}} = 0$ Wall Boundaries: $\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{wall}} = 0$ Условие на входе в расчетную область: $\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{inlet}} = V_\perp$ Inlet Boundaries: $\frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big _{\text{inlet}} = V_\perp$ Условия свободного потока: $\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big _\infty = u_\infty$, $\frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big _\infty = v_\infty$, $\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big _\infty = w_\infty$ Free stream conditions: $\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big _\infty = u_\infty$, $\frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big _\infty = v_\infty$, $\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big _\infty = w_\infty$ Условие на выходе из расчетной области: $\varphi = 0$ Outlet Boundaries: $\varphi = 0$ Поле давления: $\nabla^2 P = 0$, P — давление Pressure Field: $\nabla^2 P = 0$, P — pressure</p>

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Параметр Parameter	Описание Description
Временной шаг Time step	0,05 с / s
Максимальное количество итераций за один временной шаг Maximum number of iterations per time step	20
Модель турбулентности Turbulence model	Гибридная модель SBES с подсеточно-масштабной моделью WALE Hybrid SBES model with subgrid-scale WALE model
Решатель Solver	Основанный на решении уравнения для давления Pressure-Based
Численная схема Numerical scheme	Связанный алгоритм Coupled algorithm
Временная аппроксимация Time approximation	Неявная формулировка второго порядка Implicit second-order formulation
Физическое время счета Simulation time	200 с / s

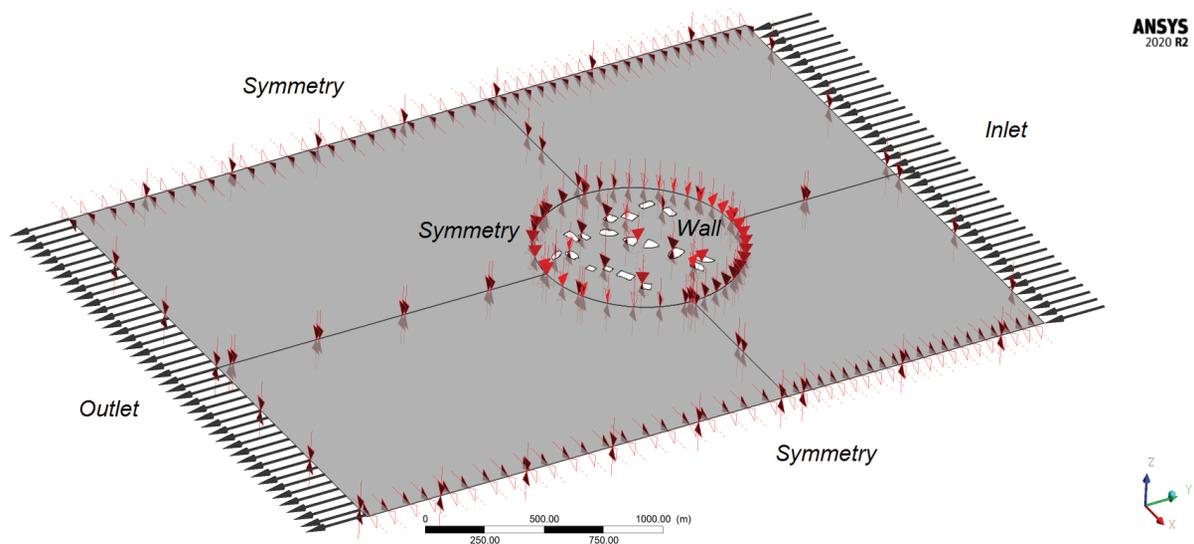


Рис. 8. Расчетная область с указанными граничными условиями для аэродинамического моделирования комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити»

Fig. 8. Computational domain with specified boundary conditions for aerodynamic simulation of the MIBC “Moscow-City”

за пульсационную составляющую принимается стандартное отклонение σ , имеющее ту же размерность, что и исходные величины:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (8)$$

где x_i — значения наблюдаемой величины (аэродинамические силы и моменты) во времени; \bar{x} — среднее значение наблюдаемой величины (средняя аэродинамическая сила и момент); N — количество выборки (отсчетов по времени).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точность и эффективность численного моделирования напрямую связаны с сеточной сходи-

мостью, настройками численных схем, выбором параметров задачи, а также с граничными и начальными условиями в расчетной модели. Для проверки корректности получаемых численных результатов аэродинамических расчетов были проведены верификация и валидация рассчитываемых моделей на основе данных экспериментальных (модельных) испытаний в АДТ, а также альтернативных численных расчетов, приведенных в литературе [25–29]. В качестве эталона для проверки методики численного моделирования выбрана задача ветрового воздействия на квадратную призму (рис. 9).

В данной задаче верифицировались и валидировались средние аэродинамические коэффициенты давления ветра C_p по контуру призмы (рис. 9), а также суммарные аэродинамические коэффициенты

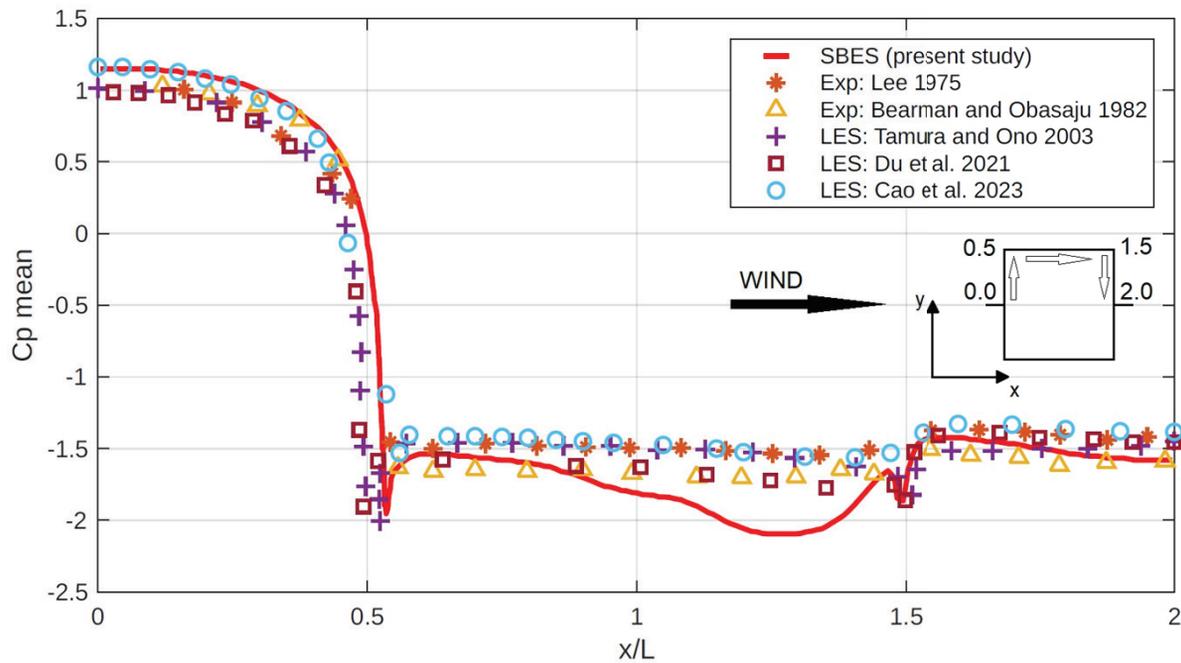


Рис. 9. Распределение среднего давления по контуру квадратной призмы. Красным цветом показаны результаты настоящего исследования по модели турбулентности SBES; маркерами отмечены результаты экспериментальных (модельных) испытаний в аэродинамических трубах, а также результаты альтернативных расчетных исследований [21–25]

Fig. 9. Mean pressure distribution along the contour of a square prism. The red colour shows the results of the present study using the SBES turbulence model; markers indicate the results of experimental (model) tests in wind tunnels, as well as the results of alternative computational studies [21–25]

средней лобовой \bar{C}_x и пульсационной подъемной C'_y сил, представленные в табл. 4.

Из результатов сопоставительного анализа для наветренной стороны аэродинамические коэффициенты показывают хорошее совпадение между данными численного моделирования моделью турбулентности SBES (настоящее исследование) и экспериментальными исследованиями в аэродинамических трубах, а также данными альтернативных расчетов с использованием модели турбулентности LES.

Согласие между экспериментальным и численным моделированием несколько ухудшается у боковых стенок и улучшается у подветренной стороны. Ухудшение результатов у боковых стенок может быть связано с особенностью квазидвухмерной постановки расчетного исследования, для которой

характерно некоторое завышение значений пульсационной составляющей по сравнению с полномасштабной трехмерной нестационарной задачей, что является приемлемым для практических расчетов. Для сопоставления аэродинамических коэффициентов сил в табл. 4 представлены результаты настоящего CFD-моделирования, а также данные альтернативных источников.

Основываясь на приведенных выше результатах верификационного и валидационного сравнения, можно сказать о корректности принятых методов и параметров численного моделирования, выбранных в настоящей статье, способных адекватно описать течение воздушных потоков и воздействие ветра на здания и сооружения для получения более точных и достоверных результатов при по-

Табл. 4. Сравнение результатов аэродинамических коэффициентов сил

Table 4. Comparison of results of aerodynamic force coefficients

Источник Source	\bar{C}_x	C'_y
SBES (present study)	2,350	1,510
Exp: Lee 1975 [25]	2,050	1,220
Exp: Bearman and Obasaju 1982 [26]	–	1,200
LES: Tamura and Ono 2003 [27]	2,130	1,200
LES: Du et al. 2021 [28]	2,090	1,470
LES: Cao et al. 2023 [29]	2,269	1,228

следующих численных расчетах комплекса ММДЦ «Москва-Сити».

В результате CFD-моделирования комплекса зданий ММДЦ «Москва-Сити» были получены графики суммарных аэродинамических сил F_x и F_y во времени. Графики изменения составляющих аэродинамической силы для комплексов 10 (1) — «IQ-квартал: Башня 3», 11 — «Федерация: Восток», 12 (1) — «Neva Towers: Башня 1» и 13 (1) — «Moscow Towers: Башня 1», приведенные на рис. 10, 11, описывают актуальную картину аэродинамических нагрузок при угле атаки ветра 315° на момент написания статьи (возведены все комплексы, кроме One Tower).

В результате аэродинамических исследований ММДЦ «Москва-Сити» получены изополя давлений, скоростей ветрового потока, завихренностей и кинетической энергии турбулентности. Для преобладающих северных и западных ветров на рис. 12–16

представлены результаты CFD-исследования аэродинамической интерференции, описывающие взаимное влияние 19 зданий ММДЦ «Москва-Сити».

Результаты ветрового воздействия в условиях окружающей застройки сравниваются с референсными значениями, представляющими собой аэродинамические силы на отдельностоящие здания (для каждого здания без учета окружающей застройки). В табл. 5 указаны значения аэродинамических сил и крутящего момента (среднее \pm пульсационное) на каждое здание из комплекса «Москва-Сити» с нумерацией, соответствующей рис. 6, *b* в зависимости от угла атаки ветра.

Каждая строка содержит значения средней \pm пульсационной составляющих ветрового воздействия, а именно аэродинамических сил F_x , F_y с размерностью 10^4 , Н, крутящий момент M_z с размерностью 10^4 , Н·м, и стандартное отклонение σ (с той же

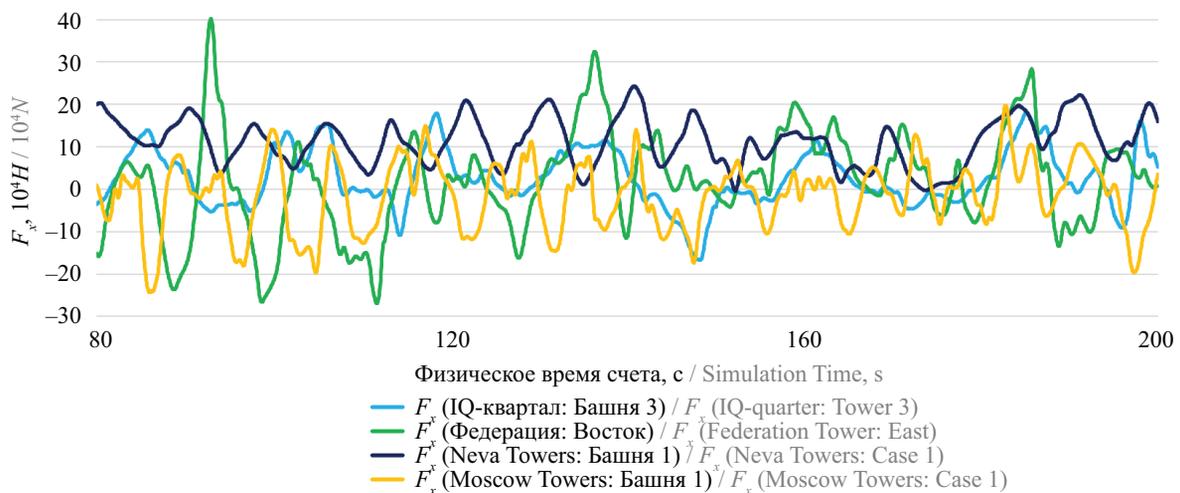


Рис. 10. Аэродинамическая сила F_x

Fig. 10. Aerodynamic force F_x

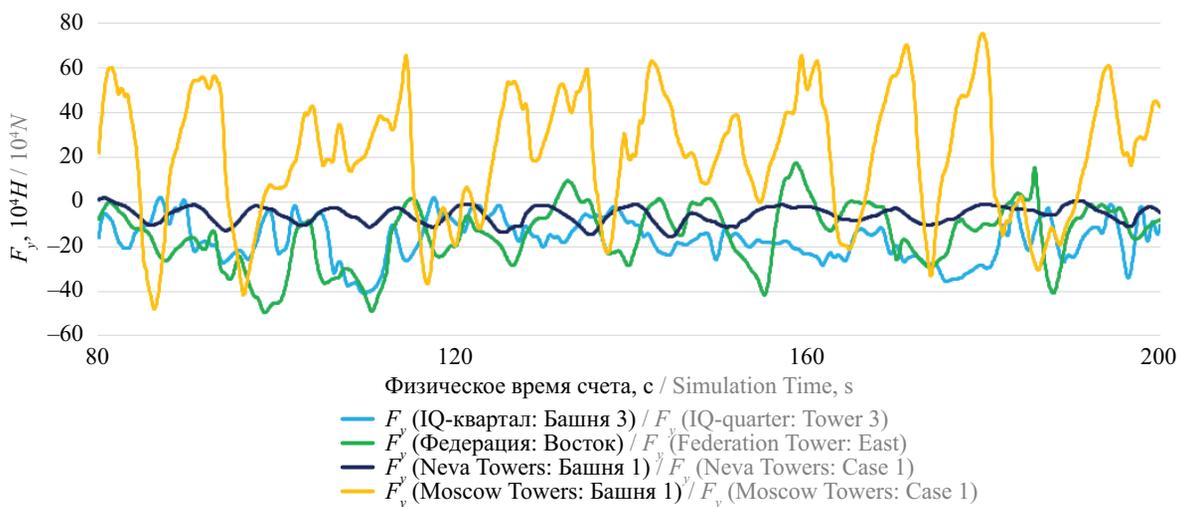


Рис. 11. Аэродинамическая сила F_y

Fig. 11. Aerodynamic force F_y

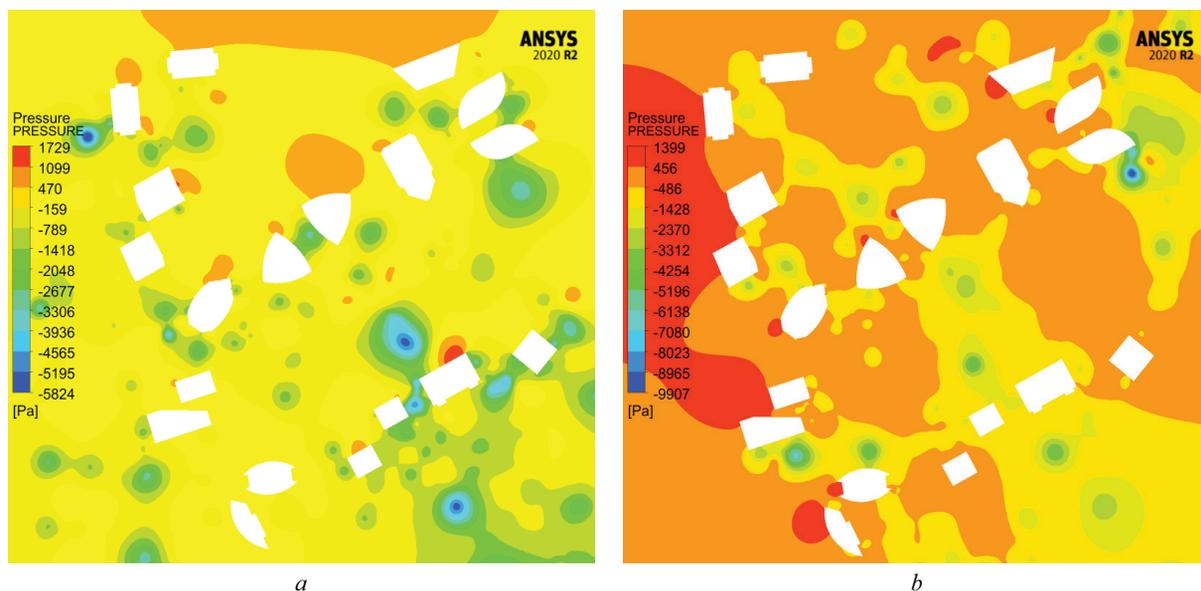


Рис. 12. Статическое давление при физическом времени $T = 200$ с: a — северный ветер (угол атаки ветра 0°); b — западный ветер (угол атаки ветра 270°)

Fig. 12. Static pressure at simulation time $T = 200$ s: a — north wind (wind attack angle 0°); b — west wind (wind attack angle 270°)

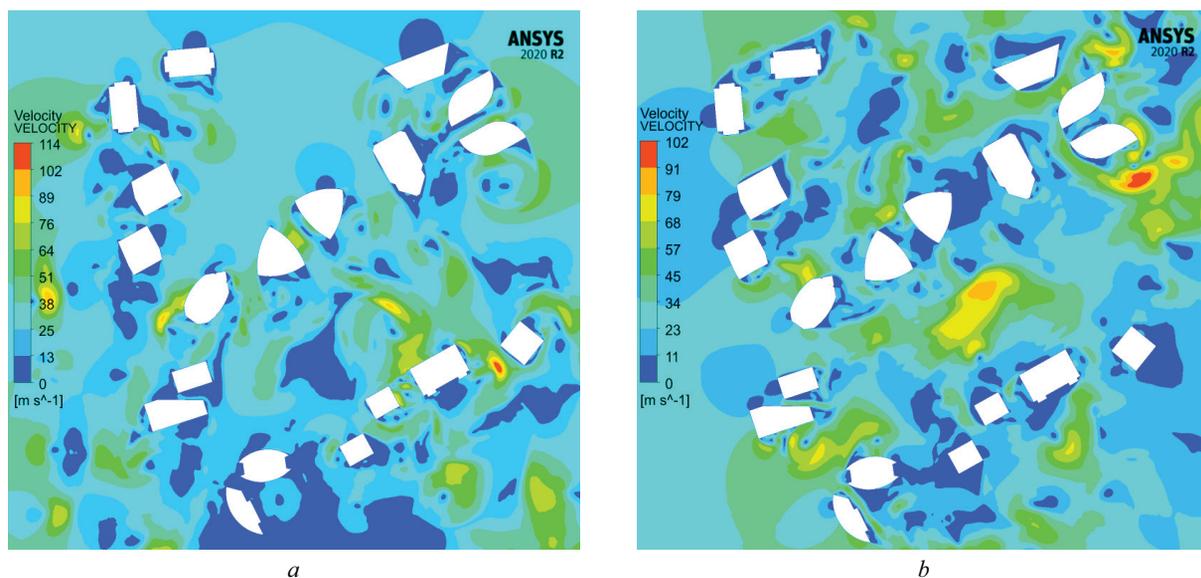


Рис. 13. Скорость ветрового потока при физическом времени $T = 200$ с: a — северный ветер (угол атаки ветра 0°); b — западный ветер (угол атаки ветра 270°)

Fig. 13. Wind flow velocity at simulation time $T = 200$ s: a — north wind (wind attack angle 0°); b — west wind (wind attack angle 270°)

размерностью), определяющее пульсационную составляющую.

Явление аэродинамической интерференции может оказывать как положительное, так и негативное влияние за счет внедрения высотных зданий в окружающую застройку. Результаты аэродинамических исследований комплекса ММДЦ «Москва-Сити» для 8 углов атаки ветра, представленные в табл. 6–19, содержат информацию о взаимном влиянии пер-

спективных зданий на существующие при их последовательном возведении.

В табл. 6–19 приняты следующие обозначения:

- первый столбец — хронологический порядок возведения зданий;
- второй столбец — обозначение корпусов строящегося комплекса. Если комплекс состоит из одного корпуса, второй столбец в таблице отсутствует;

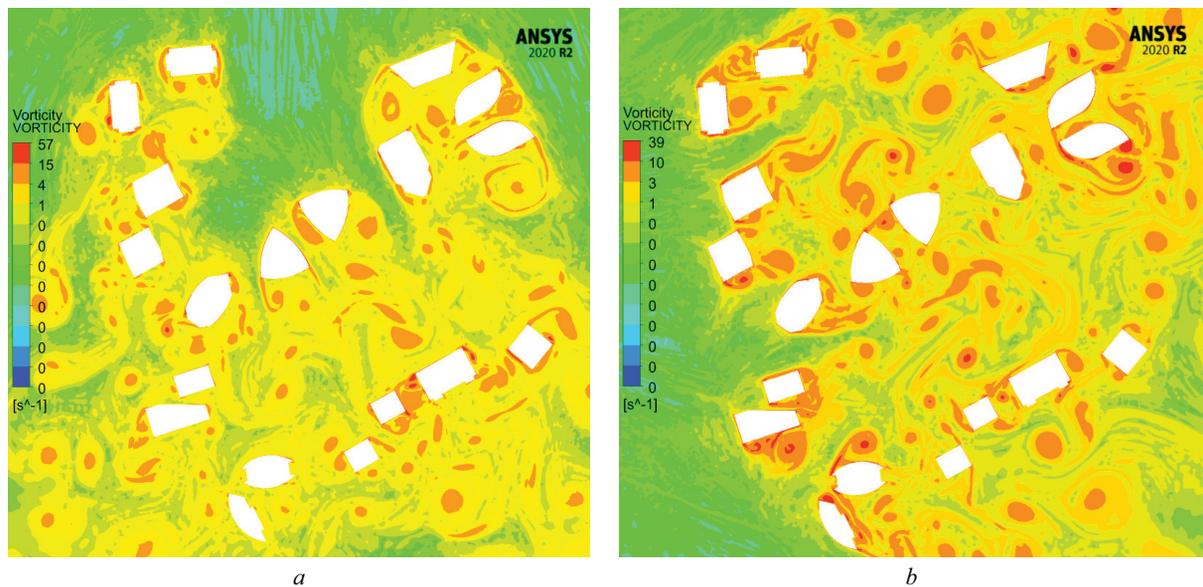


Рис. 14. Завихренности при физическом времени $T = 200$ с: a — северный ветер (угол атаки ветра 0°); b — западный ветер (угол атаки ветра 270°)

Fig. 14. Vortices at simulation time $T = 200$ s: a — north wind (wind attack angle 0°); b — west wind (wind attack angle 270°)

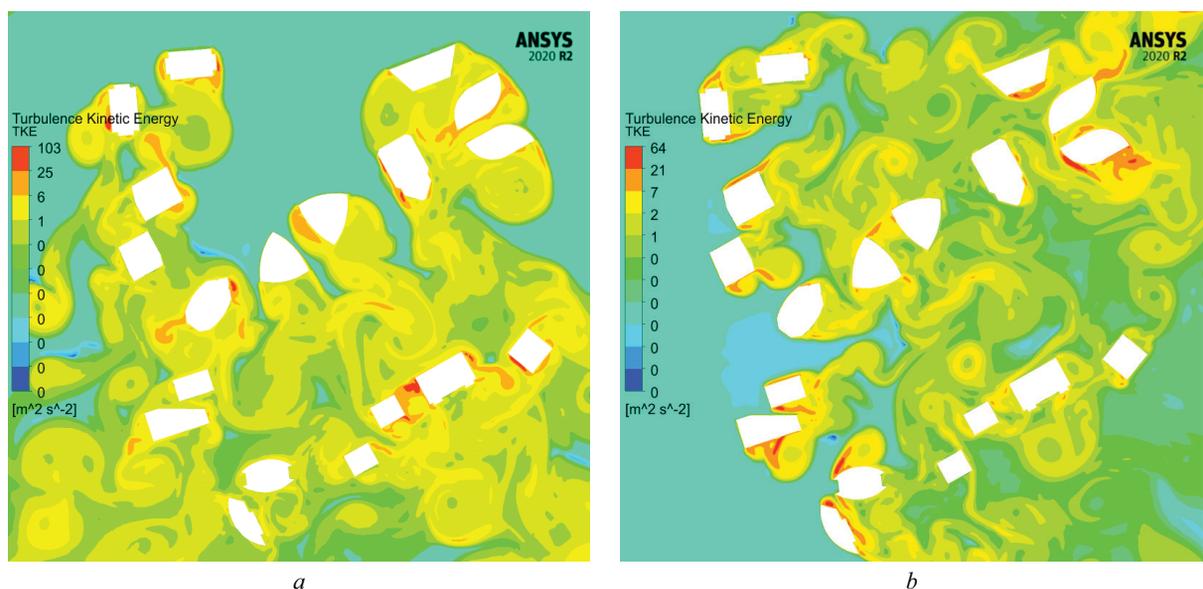


Рис. 15. Кинетическая энергия турбулентности при физическом времени $T = 200$ с: a — северный ветер (угол атаки ветра 0°); b — западный ветер (угол атаки ветра 270°)

Fig. 15. Turbulence kinetic energy (TKE) at simulation time $T = 200$ s: a — north wind (wind attack angle 0°); b — west wind (wind attack angle 270°)

- первая строка — угол атаки ветра;
- в ячейках таблицы для каждого угла атаки ветра указаны значения средней \pm пульсационной составляющих ветрового воздействия, а именно аэродинамических сил F_x, F_y с размерностью 10^4 Н, крутящий момент M_z с размерностью 10^4 Н·м, и их стандартное отклонение σ (с той же размерностью), определяющее пульсационную составляющую.

Для более наглядного представления результатов влияния аэродинамической интерференции при последовательном возведении зданий были по-

строены лепестковые диаграммы аэродинамических коэффициентов сил для средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия, определяемые по формулам:

$$C_x = \frac{F_x}{\rho \cdot u_\infty^2 \cdot S}; \quad C_y = \frac{F_y}{\rho \cdot u_\infty^2 \cdot S}; \quad C_R = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}, \quad (8)$$

где F_x, F_y — проекция суммарной аэродинамической силы на ось OX и OY соответственно, Н; $\rho = 1,225$ кг/м³ — плотность воздуха; $u_\infty = 30$ м/с —

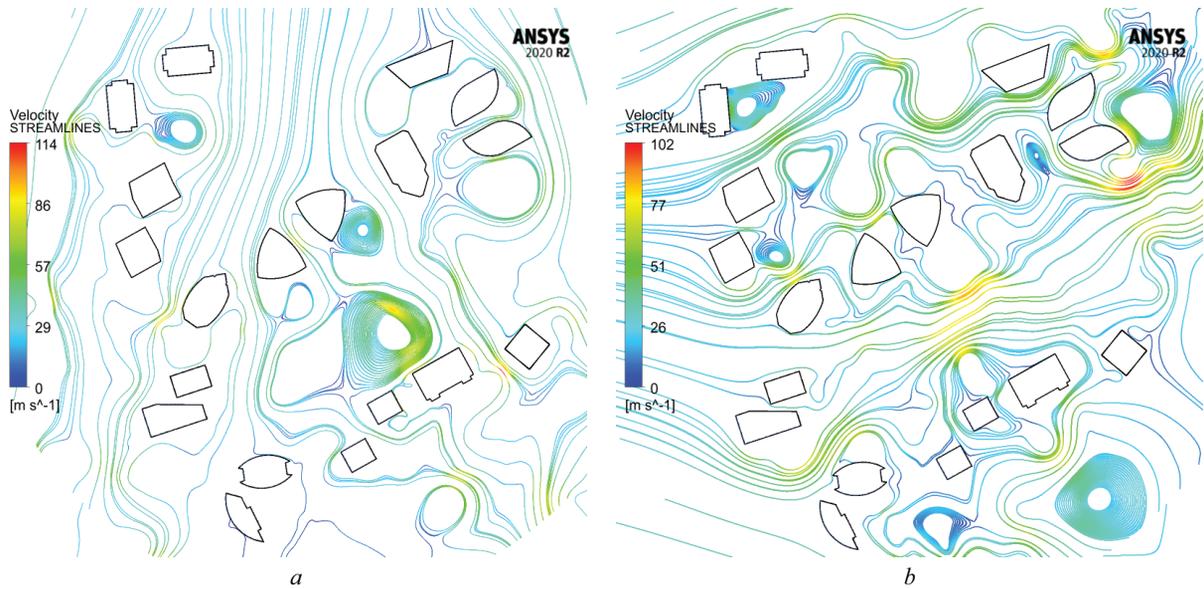


Рис. 16. Линии тока при физическом времени $T = 200$ с: a — северный ветер (угол атаки ветра 0°); b — западный ветер (угол атаки ветра 270°)

Fig. 16. Streamlines at simulation time $T = 200$ s: a — north wind (wind attack angle 0°); b — west wind (wind attack angle 270°)

Табл. 5. Ветровые воздействия на отдельностоящие здания

Table 5. Wind impacts on detached buildings

	90°			45°			0°			$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$
	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$			
43 ± 31	-1 ± 4	-4 ± 1	-98 ± 86	-18 ± 8	-9 ± 9	-4 ± 97	-34 ± 8	4 ± 13	1 (1)			
-270 ± 258	-17 ± 11	-31 ± 6	-86 ± 248	-26 ± 9	-34 ± 9	56 ± 194	-20 ± 5	-18 ± 8	1 (2)			
-10 ± 112	-8 ± 10	-25 ± 4	209 ± 126	-15 ± 12	-24 ± 13	98 ± 98	-22 ± 5	-8 ± 9	2			
-6 ± 32	3 ± 8	-13 ± 3	28 ± 40	-12 ± 3	1 ± 1	-19 ± 34	-15 ± 4	-1 ± 7	3 (1)			
-6 ± 32	3 ± 9	-14 ± 4	29 ± 42	-13 ± 3	2 ± 1	-19 ± 41	-15 ± 4	4 ± 8	3 (2)			
24 ± 145	10 ± 16	-23 ± 5	39 ± 70	-18 ± 6	-2 ± 9	-81 ± 79	-24 ± 6	-1 ± 11	4			
-201 ± 142	-1 ± 17	-30 ± 8	40 ± 178	-19 ± 8	-29 ± 11	58 ± 102	-16 ± 4	-9 ± 12	5			
-7 ± 75	3 ± 12	-24 ± 6	111 ± 126	-23 ± 5	4 ± 3	-131 ± 77	-18 ± 5	-15 ± 12	6			
3 ± 55	0 ± 11	-21 ± 5	-11 ± 67	-13 ± 9	-10 ± 7	7 ± 56	-20 ± 5	-1 ± 11	7			
226 ± 164	8 ± 15	-28 ± 6	109 ± 44	-3 ± 5	-7 ± 5	-195 ± 74	-15 ± 6	2 ± 10	8			
-13 ± 62	10 ± 10	-19 ± 4	122 ± 63	-17 ± 3	2 ± 2	-57 ± 87	-15 ± 3	-16 ± 6	9			
177 ± 55	16 ± 7	-12 ± 2	-209 ± 213	-35 ± 11	3 ± 8	-36 ± 133	-29 ± 10	-8 ± 12	10 (1)			
-15 ± 89	18 ± 4	-10 ± 2	3 ± 117	-21 ± 6	-7 ± 9	-36 ± 43	-16 ± 6	-1 ± 7	10 (2)			
1 ± 128	-2 ± 16	-29 ± 7	-16 ± 122	-17 ± 7	-17 ± 7	-18 ± 123	-25 ± 6	-5 ± 15	11			
-6 ± 113	-2 ± 13	-32 ± 7	70 ± 109	-5 ± 6	-27 ± 11	-23 ± 53	-8 ± 2	-1 ± 8	12 (1)			
-13 ± 55	-2 ± 8	-8 ± 2	-50 ± 90	-24 ± 10	-5 ± 8	-30 ± 111	-32 ± 7	2 ± 14	12 (2)			
158 ± 71	4 ± 8	-3 ± 1	-114 ± 180	-33 ± 11	-1 ± 10	111 ± 256	-42 ± 9	7 ± 13	13 (1)			
94 ± 207	23 ± 15	-34 ± 7	-28 ± 28	-5 ± 3	1 ± 2	-254 ± 176	-15 ± 7	3 ± 10	13 (2)			
226 ± 316	15 ± 19	-20 ± 4	-42 ± 122	-28 ± 4	10 ± 2	-97 ± 282	-41 ± 9	16 ± 16	14			

Окончание табл. 5 / End of the Table 5

	315°			270°			225°			180°			135°			
	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	
72 ± 95	-25 ± 9	10 ± 9	43 ± 30	2 ± 5	4 ± 1	-99 ± 87	22 ± 8	8 ± 9	1 ± 94	32 ± 7	-3 ± 12	82 ± 96	25 ± 9	-10 ± 9	1 (1)	
-88 ± 24	-8 ± 2	-5 ± 2	-179 ± 220	17 ± 9	29 ± 6	138 ± 193	21 ± 8	28 ± 10	290 ± 134	13 ± 5	11 ± 6	-179 ± 30	-6 ± 2	-9 ± 3	1 (2)	
-102 ± 111	-8 ± 12	25 ± 8	-22 ± 115	0 ± 15	26 ± 7	-19 ± 122	17 ± 7	18 ± 7	16 ± 143	26 ± 7	-5 ± 20	102 ± 79	20 ± 6	-10 ± 11	2	
14 ± 39	-14 ± 8	8 ± 5	-6 ± 33	-3 ± 9	14 ± 3	29 ± 42	13 ± 2	-2 ± 1	-21 ± 26	15 ± 4	0 ± 8	20 ± 38	12 ± 8	-9 ± 5	3 (1)	
20 ± 37	-11 ± 8	9 ± 5	-5 ± 35	-3 ± 9	15 ± 4	29 ± 40	13 ± 3	-1 ± 1	-21 ± 40	15 ± 4	1 ± 8	16 ± 42	14 ± 8	-8 ± 5	3 (2)	
58 ± 57	-10 ± 7	17 ± 5	27 ± 76	-12 ± 13	22 ± 4	50 ± 204	28 ± 6	-7 ± 4	-127 ± 166	28 ± 9	1 ± 14	68 ± 168	24 ± 14	-19 ± 8	4	
-57 ± 76	3 ± 2	18 ± 4	-120 ± 126	7 ± 11	29 ± 7	165 ± 164	26 ± 11	21 ± 15	196 ± 100	18 ± 5	15 ± 15	-163 ± 96	-2 ± 10	-23 ± 7	5	
-5 ± 88	3 ± 2	25 ± 4	-1 ± 105	-12 ± 12	22 ± 5	159 ± 116	22 ± 4	-6 ± 2	-102 ± 89	16 ± 3	7 ± 12	3 ± 55	7 ± 8	-20 ± 9	6	
-14 ± 68	-11 ± 8	10 ± 8	4 ± 51	0 ± 12	20 ± 5	-20 ± 64	11 ± 10	12 ± 7	3 ± 50	21 ± 5	1 ± 12	-14 ± 70	11 ± 8	-12 ± 9	7	
-142 ± 163	-22 ± 12	26 ± 14	56 ± 121	-8 ± 12	26 ± 6	65 ± 37	7 ± 4	-2 ± 4	-99 ± 58	13 ± 3	-3 ± 9	80 ± 150	21 ± 12	-26 ± 9	8	
1 ± 67	2 ± 3	21 ± 4	-11 ± 63	-3 ± 11	22 ± 6	102 ± 61	16 ± 4	0 ± 2	-59 ± 77	17 ± 5	8 ± 12	5 ± 72	-1 ± 2	-19 ± 5	9	
-39 ± 249	-41 ± 12	12 ± 7	-177 ± 230	-16 ± 8	12 ± 2	59 ± 330	43 ± 11	8 ± 8	195 ± 343	42 ± 11	-5 ± 11	196 ± 174	28 ± 14	-11 ± 8	10 (1)	
30 ± 80	-20 ± 10	11 ± 6	-18 ± 89	-19 ± 4	11 ± 2	6 ± 70	19 ± 7	2 ± 8	-29 ± 55	18 ± 6	-1 ± 8	28 ± 70	19 ± 9	-11 ± 5	10 (2)	
96 ± 88	-21 ± 6	10 ± 11	-7 ± 116	7 ± 10	25 ± 5	24 ± 96	19 ± 12	19 ± 12	40 ± 95	22 ± 4	6 ± 9	-92 ± 115	7 ± 13	-26 ± 8	11	
-54 ± 97	-5 ± 8	24 ± 11	-25 ± 102	3 ± 13	30 ± 7	70 ± 94	7 ± 7	25 ± 11	-24 ± 51	8 ± 2	-1 ± 8	-57 ± 102	3 ± 8	-26 ± 10	12 (1)	
67 ± 85	-23 ± 10	6 ± 7	-14 ± 52	2 ± 7	8 ± 2	-57 ± 100	25 ± 9	4 ± 7	-23 ± 115	31 ± 7	-2 ± 13	70 ± 99	25 ± 12	-6 ± 7	12 (2)	
334 ± 215	-25 ± 9	12 ± 10	169 ± 64	-3 ± 8	3 ± 1	-115 ± 170	32 ± 11	1 ± 10	115 ± 251	42 ± 13	-7 ± 13	394 ± 209	27 ± 10	-11 ± 10	13 (1)	
-205 ± 270	-31 ± 12	32 ± 11	96 ± 219	-23 ± 15	35 ± 6	-28 ± 29	5 ± 3	-1 ± 2	-268 ± 191	16 ± 6	-4 ± 9	-162 ± 260	31 ± 12	-30 ± 9	13 (2)	
332 ± 101	-39 ± 7	-4 ± 6	12 ± 110	-24 ± 4	11 ± 3	-257 ± 318	22 ± 13	7 ± 9	-220 ± 533	43 ± 10	-5 ± 7	330 ± 499	40 ± 14	-26 ± 6	14	
$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$		

Табл. 6. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс зданий 1 (1) — «Башня на Набережной: С»; 1 (2) — «Башня на Набережной: В»

Table 6. Impact of sequentially constructed buildings on 1 (1) — “Naberezhnaya Tower: C” and 1 (2) — “Naberezhnaya Tower: B”

	7		6		5		4		3		2		1	
	1(1)	1(2)	1(1)	1(2)	1(1)	1(2)	1(1)	1(2)	1(1)	1(2)	1(1)	1(2)	1(1)	1(2)
	-3 ± 16	-6 ± 17	0 ± 10	-8 ± 14	0 ± 9	-8 ± 15	-1 ± 10	-8 ± 18	1 ± 9	-8 ± 18	1 ± 8	-6 ± 12	1 ± 8	-18 ± 8
0°	-2 ± 11	-5 ± 11	-7 ± 13	-6 ± 10	-7 ± 13	-7 ± 12	-11 ± 10	-7 ± 11	-9 ± 11	-7 ± 11	-13 ± 8	-6 ± 7	-13 ± 8	-20 ± 5
	25 ± 166	6 ± 174	-20 ± 134	4 ± 170	6 ± 132	-5 ± 192	21 ± 121	18 ± 179	16 ± 128	18 ± 179	-33 ± 78	44 ± 159	-33 ± 78	56 ± 194
45°	-8 ± 14	-7 ± 8	-4 ± 7	-6 ± 10	-5 ± 6	-8 ± 10	-5 ± 5	-10 ± 11	-5 ± 4	-10 ± 11	-4 ± 3	-21 ± 9	-4 ± 3	-34 ± 9
	-3 ± 9	-4 ± 7	-4 ± 7	-2 ± 6	-5 ± 8	-3 ± 6	-6 ± 6	-5 ± 8	-5 ± 6	-5 ± 6	-8 ± 5	-10 ± 9	-8 ± 5	-26 ± 9
90°	-98 ± 194	-88 ± 155	-123 ± 85	-63 ± 131	-129 ± 93	-99 ± 135	-136 ± 51	-94 ± 164	-125 ± 48	-94 ± 164	-156 ± 55	-169 ± 200	-156 ± 55	-86 ± 248
	-37 ± 12	-37 ± 12	-7 ± 4	-34 ± 9	-8 ± 5	-36 ± 12	-8 ± 5	-35 ± 10	-8 ± 5	-35 ± 10	-14 ± 5	-29 ± 9	-14 ± 5	-31 ± 6
	-21 ± 14	-22 ± 14	11 ± 8	-20 ± 12	14 ± 9	-19 ± 14	12 ± 8	-20 ± 12	11 ± 7	-20 ± 12	17 ± 7	-16 ± 12	17 ± 7	-17 ± 11
	-358 ± 290	-356 ± 278	117 ± 88	-345 ± 253	120 ± 92	-319 ± 286	129 ± 66	-341 ± 277	128 ± 60	-341 ± 277	260 ± 75	-201 ± 237	260 ± 75	-270 ± 258
	-35 ± 9	-34 ± 8	-9 ± 8	-36 ± 9	-8 ± 6	-33 ± 9	-8 ± 6	-29 ± 8	-5 ± 6	-29 ± 8	-6 ± 7	-15 ± 4	-6 ± 7	-9 ± 3
135°	-20 ± 11	-17 ± 10	18 ± 10	-18 ± 12	17 ± 8	-17 ± 9	16 ± 9	-14 ± 8	16 ± 8	-14 ± 8	23 ± 9	-6 ± 5	23 ± 9	-6 ± 2
	-339 ± 274	-322 ± 244	144 ± 76	-321 ± 232	125 ± 66	-312 ± 252	127 ± 67	-276 ± 196	108 ± 64	-276 ± 196	229 ± 80	-204 ± 72	229 ± 80	-179 ± 30
	-10 ± 4	-5 ± 3	-6 ± 12	-5 ± 3	-6 ± 13	-6 ± 3	-7 ± 12	-2 ± 3	-5 ± 11	-2 ± 3	-3 ± 9	4 ± 3	-3 ± 9	11 ± 6
180°	-1 ± 2	2 ± 2	27 ± 7	2 ± 2	28 ± 7	1 ± 2	28 ± 7	3 ± 2	24 ± 7	3 ± 2	17 ± 6	6 ± 2	17 ± 6	13 ± 5
	146 ± 37	175 ± 33	31 ± 81	175 ± 32	26 ± 86	170 ± 32	30 ± 85	202 ± 29	53 ± 79	202 ± 29	192 ± 70	255 ± 36	192 ± 70	290 ± 134
	19 ± 4	19 ± 4	3 ± 5	19 ± 4	4 ± 6	19 ± 4	3 ± 5	19 ± 5	2 ± 6	19 ± 5	2 ± 5	20 ± 5	2 ± 5	28 ± 10
225°	14 ± 4	14 ± 4	-5 ± 13	15 ± 4	-8 ± 12	15 ± 4	-7 ± 12	14 ± 4	-3 ± 14	14 ± 4	-4 ± 13	15 ± 4	-4 ± 13	21 ± 8
	88 ± 84	83 ± 81	-16 ± 80	77 ± 78	-15 ± 81	72 ± 73	-17 ± 82	89 ± 77	-22 ± 86	89 ± 77	-39 ± 115	9 ± 62	-39 ± 115	138 ± 193
	13 ± 6	14 ± 5	7 ± 3	13 ± 5	7 ± 3	13 ± 6	7 ± 3	14 ± 5	6 ± 3	14 ± 5	6 ± 3	17 ± 5	6 ± 3	29 ± 6
270°	4 ± 5	4 ± 5	3 ± 9	3 ± 5	1 ± 8	4 ± 5	1 ± 9	5 ± 5	4 ± 8	5 ± 5	4 ± 10	8 ± 5	4 ± 10	17 ± 9
	-206 ± 73	-215 ± 77	50 ± 68	-208 ± 69	58 ± 70	-207 ± 66	48 ± 74	-202 ± 69	30 ± 65	-202 ± 69	-9 ± 84	-290 ± 76	-9 ± 84	-179 ± 220
	-8 ± 10	-7 ± 11	9 ± 6	-7 ± 10	6 ± 6	-9 ± 10	7 ± 5	-8 ± 8	8 ± 5	-8 ± 8	9 ± 5	-9 ± 7	9 ± 5	-5 ± 2
315°	-8 ± 8	-8 ± 8	-21 ± 10	-7 ± 7	-24 ± 9	-9 ± 7	-21 ± 9	-8 ± 6	-20 ± 8	-8 ± 6	-13 ± 8	-10 ± 5	-13 ± 8	-8 ± 2
	117 ± 91	117 ± 87	83 ± 90	118 ± 90	59 ± 87	111 ± 83	54 ± 84	94 ± 73	70 ± 83	94 ± 73	3 ± 80	88 ± 79	3 ± 80	-88 ± 24

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

	14		13		12		11		10		9		8		
	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	I(2)	I(1)	
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 14	-2 ± 8	-1 ± 16	-2 ± 10	-3 ± 13	-2 ± 10	-4 ± 16	-2 ± 8	-4 ± 16	-2 ± 10	-7 ± 14	-1 ± 9	-2 ± 16	-2 ± 9	0°
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 10	-9 ± 14	0 ± 10	-12 ± 15	-2 ± 10	-8 ± 15	-2 ± 10	-11 ± 11	-3 ± 10	-12 ± 15	-5 ± 11	-7 ± 13	-1 ± 10	-10 ± 17	
$M_z \pm \sigma$	13 ± 170	-44 ± 106	8 ± 203	-56 ± 141	-35 ± 187	-58 ± 146	-28 ± 203	-75 ± 135	-2 ± 237	-57 ± 142	-38 ± 200	-30 ± 143	29 ± 170	-49 ± 148	45°
$F_x \pm \sigma$	-4 ± 12	-3 ± 9	-7 ± 13	-3 ± 8	-2 ± 12	-4 ± 8	-3 ± 13	-5 ± 8	-4 ± 13	-4 ± 7	-6 ± 13	-4 ± 9	-5 ± 12	-4 ± 7	
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 8	-10 ± 11	-3 ± 8	-9 ± 11	0 ± 8	-12 ± 7	0 ± 7	-11 ± 9	-1 ± 8	-11 ± 7	-2 ± 9	-10 ± 11	-2 ± 8	-5 ± 10	
$M_z \pm \sigma$	-65 ± 193	-153 ± 107	-84 ± 166	-139 ± 117	-51 ± 168	-166 ± 105	-68 ± 155	-142 ± 106	-78 ± 169	-164 ± 79	-123 ± 192	-174 ± 90	-55 ± 181	-134 ± 87	90°
$F_x \pm \sigma$	-42 ± 13	-6 ± 5	-41 ± 12	-5 ± 5	-43 ± 10	-5 ± 5	-43 ± 10	-6 ± 5	-41 ± 9	-5 ± 3	-40 ± 13	-7 ± 7	-41 ± 12	-8 ± 6	
$F_y \pm \sigma$	-25 ± 16	8 ± 8	-26 ± 14	7 ± 8	-26 ± 13	8 ± 7	-27 ± 15	11 ± 8	-27 ± 13	9 ± 6	-25 ± 15	11 ± 9	-25 ± 15	13 ± 9	
$M_z \pm \sigma$	-378 ± 314	70 ± 92	-374 ± 327	60 ± 85	-378 ± 322	77 ± 86	-406 ± 333	103 ± 78	-413 ± 304	85 ± 72	-399 ± 306	96 ± 85	-414 ± 316	135 ± 82	135°
$F_x \pm \sigma$	-36 ± 9	-6 ± 4	-40 ± 9	-8 ± 4	-33 ± 7	-6 ± 4	-32 ± 8	-7 ± 5	-35 ± 8	-7 ± 5	-38 ± 9	-7 ± 5	-38 ± 10	-8 ± 6	
$F_y \pm \sigma$	-21 ± 11	13 ± 8	-22 ± 12	7 ± 5	-18 ± 10	13 ± 7	-17 ± 9	10 ± 7	-20 ± 11	12 ± 8	-21 ± 11	16 ± 7	-20 ± 11	19 ± 10	
$M_z \pm \sigma$	-350 ± 263	105 ± 58	-369 ± 303	117 ± 50	-329 ± 235	103 ± 57	-313 ± 231	103 ± 58	-333 ± 252	104 ± 63	-355 ± 268	133 ± 66	-346 ± 273	134 ± 76	180°
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 2	-3 ± 11	-2 ± 3	-3 ± 11	-1 ± 2	-4 ± 11	-2 ± 2	-3 ± 12	-2 ± 3	-3 ± 12	-6 ± 4	-4 ± 11	-8 ± 3	-5 ± 11	
$F_y \pm \sigma$	2 ± 2	20 ± 6	2 ± 2	20 ± 6	3 ± 2	20 ± 6	2 ± 2	21 ± 6	2 ± 2	22 ± 6	1 ± 2	26 ± 6	0 ± 2	25 ± 5	
$M_z \pm \sigma$	154 ± 32	65 ± 59	148 ± 36	66 ± 59	159 ± 36	66 ± 58	159 ± 37	68 ± 59	165 ± 38	77 ± 60	141 ± 35	28 ± 77	127 ± 37	19 ± 76	225°
$F_x \pm \sigma$	22 ± 5	6 ± 5	21 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	21 ± 5	5 ± 6	22 ± 4	7 ± 5	19 ± 5	4 ± 7	18 ± 4	3 ± 5	
$F_y \pm \sigma$	16 ± 5	-4 ± 14	15 ± 5	-2 ± 15	16 ± 5	-5 ± 15	15 ± 5	-3 ± 15	16 ± 5	-7 ± 13	15 ± 4	-2 ± 18	13 ± 4	-5 ± 12	
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 89	-9 ± 98	-8 ± 66	-18 ± 80	-8 ± 89	-13 ± 89	3 ± 72	-9 ± 84	-3 ± 80	-12 ± 85	53 ± 77	-11 ± 100	72 ± 68	-16 ± 74	270°
$F_x \pm \sigma$	16 ± 6	7 ± 5	17 ± 7	7 ± 6	15 ± 5	6 ± 5	15 ± 6	6 ± 7	14 ± 5	6 ± 5	14 ± 7	7 ± 3	14 ± 6	7 ± 4	
$F_y \pm \sigma$	7 ± 6	5 ± 15	7 ± 7	6 ± 17	5 ± 6	9 ± 14	6 ± 6	12 ± 14	6 ± 5	9 ± 12	4 ± 6	4 ± 11	4 ± 6	3 ± 10	
$M_z \pm \sigma$	-364 ± 78	-7 ± 114	-354 ± 83	-8 ± 119	-333 ± 76	-14 ± 118	-286 ± 81	-14 ± 109	-304 ± 76	-7 ± 102	-226 ± 76	49 ± 91	-226 ± 75	48 ± 83	315°
$F_x \pm \sigma$	-4 ± 14	-3 ± 8	-3 ± 14	-1 ± 8	-5 ± 10	-2 ± 6	0 ± 11	-1 ± 6	-2 ± 12	0 ± 7	-8 ± 11	6 ± 6	-10 ± 15	10 ± 7	
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 11	-1 ± 13	-3 ± 10	-4 ± 13	-3 ± 8	0 ± 11	0 ± 8	-5 ± 11	-1 ± 8	-4 ± 11	-9 ± 8	-8 ± 11	-10 ± 9	-15 ± 14	
$M_z \pm \sigma$	-65 ± 214	-34 ± 141	-104 ± 185	-51 ± 138	-73 ± 159	-3 ± 102	-61 ± 144	-30 ± 120	-36 ± 157	-31 ± 123	20 ± 126	54 ± 101	122 ± 142	99 ± 143	

Табл. 8. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс зданий 3 (1) — «Город столиц: Москва» и 3 (2) — «Город столиц: Санкт-Петербург»

Table 8. Impact of sequentially constructed buildings on 3 (1) — “City of Capitals: Moscow” and 3 (2) — “City of Capitals: Saint-Petersburg”

	8		7		6		5		4		3	
	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)
	2 ± 7	5 ± 8	3 ± 8	5 ± 8	0 ± 7	3 ± 6	2 ± 6	5 ± 7	4 ± 5	-1 ± 6	3 ± 5	3(1)
	-9 ± 9	-9 ± 7	-11 ± 9	-10 ± 6	-11 ± 9	-7 ± 7	-8 ± 8	-8 ± 7	-12 ± 7	-13 ± 4	-11 ± 6	-12 ± 3
	-8 ± 39	-14 ± 36	-14 ± 39	-21 ± 36	-8 ± 37	-15 ± 31	-10 ± 33	-9 ± 39	-8 ± 26	-25 ± 30	-12 ± 26	-19 ± 27
	-1 ± 5	1 ± 4	-1 ± 4	2 ± 3	-1 ± 7	0 ± 4	0 ± 6	1 ± 3	-1 ± 6	1 ± 3	0 ± 5	0 ± 2
	-1 ± 6	-5 ± 3	1 ± 4	-7 ± 3	0 ± 6	-5 ± 4	0 ± 5	-5 ± 3	1 ± 6	-5 ± 3	-2 ± 7	-11 ± 3
	6 ± 24	-4 ± 14	6 ± 21	-2 ± 15	3 ± 25	-1 ± 15	6 ± 22	-3 ± 14	6 ± 25	-2 ± 15	-11 ± 37	21 ± 35
	-11 ± 4	-9 ± 4	-10 ± 4	-9 ± 4	-10 ± 4	-8 ± 4	-10 ± 4	-7 ± 5	-10 ± 4	-7 ± 4	-9 ± 3	-14 ± 3
	-3 ± 7	7 ± 4	-4 ± 6	6 ± 5	-2 ± 6	7 ± 4	-2 ± 6	7 ± 4	-1 ± 6	7 ± 4	-1 ± 5	10 ± 7
	-17 ± 22	3 ± 19	-16 ± 23	3 ± 18	-15 ± 24	4 ± 18	-15 ± 23	4 ± 18	-15 ± 24	7 ± 18	-13 ± 20	-3 ± 39
	-20 ± 5	-8 ± 6	-19 ± 5	-8 ± 5	-19 ± 5	-8 ± 6	-18 ± 5	-7 ± 6	-19 ± 5	-7 ± 5	-17 ± 4	-5 ± 5
	11 ± 10	9 ± 4	9 ± 9	8 ± 5	8 ± 9	8 ± 5	10 ± 9	9 ± 6	10 ± 9	9 ± 5	9 ± 8	9 ± 4
	5 ± 50	15 ± 23	3 ± 40	16 ± 25	6 ± 45	16 ± 24	6 ± 48	13 ± 23	6 ± 49	13 ± 21	13 ± 44	0 ± 20
	2 ± 3	-7 ± 5	1 ± 4	-7 ± 6	3 ± 4	-7 ± 5	3 ± 4	-7 ± 4	3 ± 4	-7 ± 6	0 ± 5	-5 ± 6
	13 ± 31	9 ± 4	13 ± 2	10 ± 5	14 ± 2	10 ± 5	13 ± 2	10 ± 5	14 ± 2	11 ± 6	14 ± 3	10 ± 5
	-17 ± 52	0 ± 18	-17 ± 29	1 ± 23	-22 ± 25	2 ± 20	-21 ± 26	-1 ± 17	-21 ± 27	-2 ± 27	-14 ± 28	-9 ± 29
	-1 ± 9	-1 ± 5	-1 ± 7	-1 ± 4	0 ± 6	0 ± 5	-1 ± 7	-1 ± 5	-1 ± 6	-1 ± 4	-1 ± 6	1 ± 5
	3 ± 5	1 ± 5	3 ± 4	0 ± 5	3 ± 5	1 ± 5	4 ± 4	0 ± 5	5 ± 4	0 ± 5	4 ± 5	-2 ± 5
	-6 ± 26	2 ± 23	-8 ± 25	4 ± 23	-7 ± 26	5 ± 26	-8 ± 25	6 ± 23	-6 ± 27	3 ± 22	-7 ± 25	3 ± 24
	13 ± 7	14 ± 7	12 ± 5	16 ± 5	14 ± 6	18 ± 6	12 ± 5	18 ± 5	12 ± 6	14 ± 5	12 ± 6	13 ± 4
	7 ± 9	2 ± 8	-8 ± 5	-2 ± 8	-10 ± 8	-2 ± 9	-10 ± 7	-5 ± 8	-10 ± 7	-2 ± 6	-10 ± 7	0 ± 6
	11 ± 30	-19 ± 29	11 ± 20	-12 ± 34	10 ± 33	-11 ± 35	10 ± 31	-4 ± 38	7 ± 28	-8 ± 26	8 ± 27	-12 ± 21
	4 ± 6	6 ± 8	5 ± 6	8 ± 8	4 ± 4	8 ± 7	6 ± 7	11 ± 8	6 ± 6	15 ± 7	6 ± 5	12 ± 8
	-4 ± 7	-6 ± 6	-8 ± 7	-7 ± 5	-6 ± 5	-4 ± 5	-12 ± 8	-4 ± 8	-9 ± 6	-4 ± 8	-10 ± 5	-3 ± 8
	5 ± 32	-8 ± 41	6 ± 33	-11 ± 34	9 ± 21	-8 ± 31	10 ± 41	3 ± 41	14 ± 30	2 ± 38	12 ± 26	2 ± 36

	14		13		12		11		10		9	
	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)	3(2)	3(1)
$F_x \pm \sigma$	1 ± 8	4 ± 8	2 ± 7	3 ± 8	3 ± 9	3 ± 8	1 ± 6	3 ± 8	3 ± 7	5 ± 8	4 ± 8	3 ± 6
$F_y \pm \sigma$	-4 ± 9	-5 ± 8	-5 ± 11	-6 ± 7	-8 ± 10	-9 ± 7	-5 ± 9	-8 ± 6	-11 ± 9	-10 ± 7	-9 ± 8	-9 ± 7
$M_z \pm \sigma$	-2 ± 37	-7 ± 41	1 ± 38	-10 ± 38	-1 ± 42	-13 ± 34	3 ± 32	-14 ± 33	-8 ± 40	-20 ± 38	-3 ± 34	-20 ± 32
$F_x \pm \sigma$	0 ± 6	2 ± 7	0 ± 6	1 ± 6	-1 ± 6	1 ± 4	-1 ± 6	2 ± 3	0 ± 7	1 ± 4	-1 ± 5	1 ± 3
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 6	-4 ± 7	-1 ± 7	-4 ± 6	-1 ± 6	-9 ± 4	-1 ± 5	-6 ± 3	-1 ± 6	-8 ± 4	0 ± 6	-7 ± 3
$M_z \pm \sigma$	5 ± 27	-7 ± 24	8 ± 31	-7 ± 25	12 ± 31	-6 ± 18	8 ± 23	-5 ± 16	9 ± 26	-6 ± 14	9 ± 26	-5 ± 15
$F_x \pm \sigma$	-8 ± 3	-7 ± 4	-8 ± 3	-8 ± 4	-7 ± 3	-7 ± 3	-8 ± 3	-8 ± 3	-8 ± 3	-6 ± 2	-9 ± 4	-8 ± 4
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 6	6 ± 4	-2 ± 5	6 ± 4	-2 ± 5	6 ± 3	-3 ± 5	6 ± 4	-2 ± 5	6 ± 3	-2 ± 6	7 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-16 ± 21	4 ± 17	-15 ± 21	1 ± 16	-16 ± 19	3 ± 13	-16 ± 18	4 ± 15	-15 ± 18	2 ± 11	-16 ± 22	2 ± 18
$F_x \pm \sigma$	-16 ± 4	-6 ± 4	-16 ± 4	-7 ± 5	-17 ± 4	-6 ± 5	-17 ± 4	-6 ± 5	-17 ± 4	-7 ± 5	-19 ± 5	-7 ± 5
$F_y \pm \sigma$	8 ± 8	7 ± 3	-2 ± 4	9 ± 5	10 ± 8	8 ± 4	9 ± 8	8 ± 5	9 ± 9	7 ± 4	11 ± 9	8 ± 4
$M_z \pm \sigma$	3 ± 38	14 ± 17	19 ± 29	12 ± 28	4 ± 43	12 ± 18	4 ± 41	12 ± 21	4 ± 41	15 ± 17	1 ± 48	13 ± 19
$F_x \pm \sigma$	3 ± 4	-7 ± 6	3 ± 4	-7 ± 4	4 ± 4	-8 ± 6	3 ± 4	-7 ± 5	3 ± 4	-8 ± 6	1 ± 4	-7 ± 5
$F_y \pm \sigma$	14 ± 3	10 ± 5	13 ± 3	9 ± 4	15 ± 3	10 ± 4	14 ± 3	10 ± 4	15 ± 3	10 ± 5	14 ± 3	10 ± 4
$M_z \pm \sigma$	-18 ± 26	-2 ± 27	-18 ± 25	-3 ± 17	-19 ± 29	-1 ± 20	-20 ± 27	0 ± 17	-19 ± 28	3 ± 25	-19 ± 29	2 ± 18
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 7	0 ± 6	-3 ± 6	0 ± 6	-3 ± 8	0 ± 5	1 ± 8	-2 ± 6	-2 ± 6	-1 ± 5	-1 ± 6	-1 ± 5
$F_y \pm \sigma$	2 ± 7	0 ± 7	2 ± 6	-1 ± 7	2 ± 7	0 ± 6	2 ± 6	0 ± 6	3 ± 6	0 ± 6	3 ± 6	0 ± 6
$M_z \pm \sigma$	-4 ± 31	4 ± 31	-5 ± 29	5 ± 30	-7 ± 27	1 ± 24	-11 ± 30	4 ± 27	-8 ± 28	6 ± 30	-6 ± 25	1 ± 24
$F_x \pm \sigma$	2 ± 7	4 ± 8	2 ± 6	5 ± 9	1 ± 5	4 ± 7	2 ± 7	4 ± 8	0 ± 7	6 ± 8	13 ± 6	15 ± 5
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 7	-4 ± 9	-2 ± 8	-3 ± 8	-2 ± 6	-3 ± 8	-3 ± 7	-1 ± 9	-1 ± 8	-4 ± 8	-8 ± 6	2 ± 9
$M_z \pm \sigma$	-1 ± 36	10 ± 44	-4 ± 37	6 ± 35	2 ± 31	5 ± 39	-1 ± 35	8 ± 39	-6 ± 35	2 ± 38	12 ± 26	-19 ± 36
$F_x \pm \sigma$	3 ± 10	7 ± 10	4 ± 8	6 ± 9	2 ± 5	6 ± 9	4 ± 8	7 ± 9	3 ± 7	5 ± 8	4 ± 5	5 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-7 ± 9	-1 ± 10	-6 ± 9	-2 ± 8	-4 ± 6	-2 ± 9	-5 ± 8	-5 ± 7	-6 ± 8	-7 ± 8	-4 ± 6	-6 ± 5
$M_z \pm \sigma$	1 ± 36	1 ± 43	1 ± 36	-4 ± 37	-11 ± 32	-2 ± 36	-6 ± 38	-1 ± 35	-3 ± 31	-6 ± 37	6 ± 23	-9 ± 30

Табл. 10. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 5 — «Меркурий»

Table 10. Impact of sequentially constructed buildings on 5 — “Mercury City Tower”

	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 11	-4 ± 12	-2 ± 9	-3 ± 8	-8 ± 8	-7 ± 9	-7 ± 8	-7 ± 8	-8 ± 8	-8 ± 10
$F_y \pm \sigma$	-5 ± 8	-15 ± 6	-12 ± 4	-12 ± 3	-11 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 3	-12 ± 4
$M_z \pm \sigma$	44 ± 123	78 ± 107	30 ± 88	42 ± 84	42 ± 79	42 ± 80	36 ± 79	46 ± 84	50 ± 85	42 ± 86
$F_x \pm \sigma$	-9 ± 8	-9 ± 10	-18 ± 7	-18 ± 6	-20 ± 8	-25 ± 8	-24 ± 9	-25 ± 9	-23 ± 8	-27 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-3 ± 7	-7 ± 5	-11 ± 5	-8 ± 7	-10 ± 7	-12 ± 9	-12 ± 9	-13 ± 8	-12 ± 8	-14 ± 9
$M_z \pm \sigma$	50 ± 91	48 ± 85	55 ± 78	38 ± 98	-1 ± 107	6 ± 123	-13 ± 131	8 ± 135	27 ± 123	4 ± 137
$F_x \pm \sigma$	-31 ± 10	-29 ± 11	-26 ± 7	-29 ± 7	-29 ± 9	-30 ± 8	-29 ± 9	-29 ± 8	-32 ± 8	-34 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-15 ± 12	-13 ± 13	-11 ± 10	-8 ± 13	-2 ± 16	-6 ± 17	-2 ± 18	1 ± 16	-5 ± 17	0 ± 20
$M_z \pm \sigma$	-190 ± 145	-130 ± 150	-154 ± 133	-208 ± 139	-223 ± 161	-219 ± 154	-221 ± 145	-251 ± 139	-202 ± 168	-234 ± 164
$F_x \pm \sigma$	-10 ± 11	-9 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 14	-8 ± 14	-9 ± 13	-7 ± 18	-10 ± 14	-17 ± 16	-16 ± 14
$F_y \pm \sigma$	7 ± 10	6 ± 10	6 ± 9	5 ± 8	4 ± 12	0 ± 10	-1 ± 13	1 ± 11	2 ± 12	3 ± 13
$M_z \pm \sigma$	-117 ± 159	-103 ± 184	-6 ± 184	2 ± 173	-41 ± 181	-61 ± 179	-44 ± 250	-96 ± 180	-106 ± 226	-109 ± 159
$F_x \pm \sigma$	10 ± 18	6 ± 16	10 ± 17	11 ± 20	10 ± 18	13 ± 21	12 ± 15	6 ± 14	6 ± 14	8 ± 16
$F_y \pm \sigma$	7 ± 10	8 ± 11	9 ± 13	7 ± 10	6 ± 12	7 ± 12	9 ± 12	4 ± 9	10 ± 13	7 ± 8
$M_z \pm \sigma$	88 ± 266	76 ± 226	126 ± 222	107 ± 219	74 ± 209	75 ± 235	96 ± 185	39 ± 191	80 ± 158	67 ± 188
$F_x \pm \sigma$	6 ± 10	6 ± 11	9 ± 14	6 ± 11	5 ± 11	8 ± 14	9 ± 20	4 ± 14	1 ± 11	4 ± 15
$F_y \pm \sigma$	6 ± 9	4 ± 8	9 ± 10	6 ± 9	8 ± 8	10 ± 11	10 ± 14	6 ± 11	5 ± 12	7 ± 12
$M_z \pm \sigma$	73 ± 139	94 ± 139	91 ± 184	63 ± 138	109 ± 122	143 ± 204	203 ± 186	149 ± 203	158 ± 172	159 ± 157
$F_x \pm \sigma$	11 ± 11	4 ± 14	8 ± 13	11 ± 11	10 ± 10	10 ± 9	14 ± 10	10 ± 11	11 ± 10	23 ± 14
$F_y \pm \sigma$	4 ± 14	0 ± 11	4 ± 15	3 ± 11	2 ± 12	3 ± 10	7 ± 13	3 ± 12	4 ± 15	9 ± 15
$M_z \pm \sigma$	-32 ± 161	-30 ± 155	-21 ± 188	-39 ± 168	-58 ± 135	-63 ± 138	-130 ± 175	-69 ± 153	-96 ± 163	-172 ± 171
$F_x \pm \sigma$	17 ± 18	18 ± 15	20 ± 17	22 ± 12	22 ± 11	18 ± 8	22 ± 11	16 ± 6	21 ± 5	21 ± 5
$F_y \pm \sigma$	-7 ± 16	-3 ± 12	0 ± 18	-4 ± 12	-4 ± 12	-2 ± 8	-3 ± 11	-1 ± 6	3 ± 3	4 ± 3
$M_z \pm \sigma$	-33 ± 193	-79 ± 184	-74 ± 186	-108 ± 127	-62 ± 111	-46 ± 101	-46 ± 115	-48 ± 87	-88 ± 97	-99 ± 95

Табл. 11. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 6 — «ОКО: Северная башня»

Table 11. Impact of sequentially constructed buildings on 6 — “OKO: North Tower”

	0°		45°		90°		135°		180°		225°		270°		315°			
$F_x \pm \sigma$	-3 ± 13	-3 ± 12	2 ± 11	34 ± 107	-6 ± 15	7 ± 15	-1 ± 11	-1 ± 10	-1 ± 10	-1 ± 10	14 ± 9	8 ± 14	19 ± 7	0 ± 8	42 ± 67	18 ± 9	-3 ± 7	61 ± 57
$F_y \pm \sigma$	-3 ± 8	-3 ± 8	2 ± 11	34 ± 107	-6 ± 15	7 ± 15	-1 ± 11	-1 ± 10	-1 ± 10	-1 ± 10	8 ± 14	8 ± 14	8 ± 14	0 ± 8	42 ± 67	18 ± 9	-3 ± 7	61 ± 57
$M_z \pm \sigma$	-16 ± 111	-14 ± 106	-22 ± 9	34 ± 107	-6 ± 15	7 ± 15	-28 ± 77	-28 ± 77	-28 ± 77	-28 ± 77	14 ± 9	14 ± 9	14 ± 9	19 ± 7	19 ± 7	19 ± 7	19 ± 7	19 ± 7
$F_x \pm \sigma$	-8 ± 5	-3 ± 12	7 ± 11	27 ± 85	-4 ± 13	6 ± 14	-4 ± 9	-1 ± 10	-1 ± 10	-1 ± 10	9 ± 15	6 ± 14	15 ± 5	5 ± 8	37 ± 70	23 ± 4	-4 ± 6	25 ± 73
$F_y \pm \sigma$	-21 ± 3	-3 ± 8	7 ± 11	27 ± 85	-4 ± 13	6 ± 14	-4 ± 9	-1 ± 10	-1 ± 10	9 ± 15	6 ± 14	6 ± 14	15 ± 5	5 ± 8	37 ± 70	23 ± 4	-4 ± 6	25 ± 73
$M_z \pm \sigma$	-51 ± 61	-17 ± 97	-30 ± 9	27 ± 85	-10 ± 13	6 ± 14	-11 ± 79	-11 ± 79	-11 ± 79	-15 ± 80	9 ± 15	68 ± 138	15 ± 5	63 ± 85	49 ± 68	20 ± 7	-4 ± 7	55 ± 68
$F_x \pm \sigma$	-10 ± 5	-3 ± 12	6 ± 9	31 ± 79	-16 ± 12	6 ± 12	-5 ± 57	-5 ± 57	-5 ± 57	-7 ± 14	11 ± 11	4 ± 14	13 ± 4	2 ± 5	22 ± 48	26 ± 5	-4 ± 7	27 ± 86
$F_y \pm \sigma$	-20 ± 3	-3 ± 8	6 ± 9	31 ± 79	-16 ± 12	6 ± 12	-5 ± 57	-5 ± 57	-5 ± 57	-7 ± 14	11 ± 11	4 ± 14	13 ± 4	2 ± 5	22 ± 48	26 ± 5	-4 ± 7	27 ± 86
$M_z \pm \sigma$	-73 ± 52	-14 ± 106	-27 ± 9	31 ± 79	-16 ± 12	6 ± 12	-5 ± 57	-5 ± 57	-5 ± 57	-7 ± 14	11 ± 11	4 ± 14	13 ± 4	2 ± 5	22 ± 48	26 ± 5	-4 ± 7	27 ± 86
$F_x \pm \sigma$	-9 ± 4	-3 ± 12	5 ± 10	25 ± 73	-16 ± 13	8 ± 12	-2 ± 67	-2 ± 67	-2 ± 67	0 ± 8	12 ± 13	5 ± 15	14 ± 5	6 ± 6	33 ± 58	22 ± 6	-3 ± 5	26 ± 73
$F_y \pm \sigma$	-19 ± 2	-3 ± 8	5 ± 10	25 ± 73	-16 ± 13	8 ± 12	-2 ± 67	-2 ± 67	-2 ± 67	0 ± 8	12 ± 13	5 ± 15	14 ± 5	6 ± 6	33 ± 58	22 ± 6	-3 ± 5	26 ± 73
$M_z \pm \sigma$	-68 ± 47	-14 ± 106	-27 ± 8	25 ± 73	-16 ± 13	8 ± 12	-2 ± 67	-2 ± 67	-2 ± 67	0 ± 8	12 ± 13	5 ± 15	14 ± 5	6 ± 6	33 ± 58	22 ± 6	-3 ± 5	26 ± 73
$F_x \pm \sigma$	1 ± 14	-3 ± 12	109 ± 119	109 ± 119	-13 ± 13	0 ± 15	-1 ± 10	-2 ± 10	-2 ± 10	-6 ± 19	-10 ± 4	31 ± 5	19 ± 3	-23 ± 3	1 ± 134	13 ± 4	0 ± 3	-1 ± 54
$F_y \pm \sigma$	-30 ± 7	-3 ± 8	109 ± 119	109 ± 119	-13 ± 13	0 ± 15	-1 ± 10	-2 ± 10	-2 ± 10	-6 ± 19	-10 ± 4	31 ± 5	19 ± 3	-23 ± 3	1 ± 134	13 ± 4	0 ± 3	-1 ± 54
$M_z \pm \sigma$	-61 ± 147	-14 ± 106	-18 ± 15	109 ± 119	-13 ± 13	0 ± 15	-1 ± 10	-2 ± 10	-2 ± 10	-6 ± 19	-10 ± 4	31 ± 5	19 ± 3	-23 ± 3	1 ± 134	13 ± 4	0 ± 3	-1 ± 54
$F_x \pm \sigma$	-14 ± 15	-3 ± 12	113 ± 122	113 ± 122	-14 ± 15	2 ± 16	-5 ± 13	3 ± 14	3 ± 14	-13 ± 23	-9 ± 4	30 ± 5	17 ± 3	-15 ± 7	0 ± 102	17 ± 4	1 ± 2	-3 ± 67
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 8	-3 ± 8	113 ± 122	113 ± 122	-14 ± 15	2 ± 16	-5 ± 13	3 ± 14	3 ± 14	-13 ± 23	-9 ± 4	30 ± 5	17 ± 3	-15 ± 7	0 ± 102	17 ± 4	1 ± 2	-3 ± 67
$M_z \pm \sigma$	-76 ± 128	-14 ± 106	-14 ± 15	113 ± 122	-14 ± 15	2 ± 16	-5 ± 13	3 ± 14	3 ± 14	-13 ± 23	-9 ± 4	30 ± 5	17 ± 3	-15 ± 7	0 ± 102	17 ± 4	1 ± 2	-3 ± 67
$F_x \pm \sigma$	-8 ± 16	-3 ± 12	113 ± 122	113 ± 122	-14 ± 15	2 ± 16	-5 ± 13	3 ± 14	3 ± 14	-13 ± 23	-9 ± 4	30 ± 5	17 ± 3	-15 ± 7	0 ± 102	17 ± 4	1 ± 2	-3 ± 67
$F_y \pm \sigma$	-27 ± 8	-3 ± 8	113 ± 122	113 ± 122	-14 ± 15	2 ± 16	-5 ± 13	3 ± 14	3 ± 14	-13 ± 23	-9 ± 4	30 ± 5	17 ± 3	-15 ± 7	0 ± 102	17 ± 4	1 ± 2	-3 ± 67
$M_z \pm \sigma$	-93 ± 88	-14 ± 106	-6 ± 11	140 ± 137	-15 ± 14	5 ± 124	-4 ± 10	2 ± 8	2 ± 8	-7 ± 29	-9 ± 3	30 ± 5	154 ± 133	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3
$F_x \pm \sigma$	-12 ± 14	-3 ± 12	-6 ± 11	140 ± 137	-15 ± 14	5 ± 124	-4 ± 10	2 ± 8	2 ± 8	-7 ± 29	-9 ± 3	30 ± 5	154 ± 133	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3
$F_y \pm \sigma$	-21 ± 5	-3 ± 8	-6 ± 11	140 ± 137	-15 ± 14	5 ± 124	-4 ± 10	2 ± 8	2 ± 8	-7 ± 29	-9 ± 3	30 ± 5	154 ± 133	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3
$M_z \pm \sigma$	-93 ± 88	-14 ± 106	-6 ± 11	140 ± 137	-15 ± 14	5 ± 124	-4 ± 10	2 ± 8	2 ± 8	-7 ± 29	-9 ± 3	30 ± 5	154 ± 133	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3	18 ± 3

Табл. 12. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 7 — «Эволюция»

Table 12. Impact of sequentially constructed buildings on 7 — “Evolution Tower”

	0°		45°		90°		135°		180°		225°		270°		315°		
$F_x \pm \sigma$	8 ± 12	-24 ± 5	-8 ± 8	7 ± 48	-16 ± 3	-10 ± 7	11 ± 51	10 ± 3	24 ± 4	19 ± 7	8 ± 9	8 ± 7	-2 ± 43	10 ± 40	13 ± 11	-14 ± 12	1 ± 80
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 5	-24 ± 7	-10 ± 8	7 ± 48	-16 ± 3	-10 ± 7	11 ± 51	10 ± 3	24 ± 4	19 ± 7	8 ± 9	8 ± 7	-2 ± 43	10 ± 40	13 ± 11	-14 ± 12	1 ± 80
$M_z \pm \sigma$	-6 ± 66	-12 ± 69	-10 ± 8	7 ± 48	-16 ± 3	-10 ± 7	11 ± 51	10 ± 3	24 ± 4	19 ± 7	8 ± 9	8 ± 7	-2 ± 43	10 ± 40	13 ± 11	-14 ± 12	1 ± 80
$F_x \pm \sigma$	4 ± 14	-24 ± 6	-5 ± 7	9 ± 52	-15 ± 3	4 ± 7	10 ± 46	10 ± 3	24 ± 4	18 ± 7	11 ± 9	5 ± 7	-2 ± 52	11 ± 48	12 ± 9	-9 ± 10	20 ± 74
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 6	-24 ± 7	-5 ± 7	9 ± 52	-15 ± 3	4 ± 7	10 ± 46	10 ± 3	24 ± 4	18 ± 7	11 ± 9	5 ± 7	-2 ± 52	11 ± 48	12 ± 9	-9 ± 10	20 ± 74
$M_z \pm \sigma$	-15 ± 70	-15 ± 70	-5 ± 7	9 ± 52	-15 ± 3	4 ± 7	10 ± 46	10 ± 3	24 ± 4	18 ± 7	11 ± 9	5 ± 7	-2 ± 52	11 ± 48	12 ± 9	-9 ± 10	20 ± 74
$F_x \pm \sigma$	6 ± 12	-24 ± 7	-10 ± 8	0 ± 48	-15 ± 3	2 ± 8	9 ± 37	-8 ± 12	22 ± 5	19 ± 7	9 ± 8	6 ± 7	-2 ± 42	0 ± 61	13 ± 10	-9 ± 11	3 ± 77
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 7	-24 ± 7	-10 ± 8	0 ± 48	-15 ± 3	2 ± 8	9 ± 37	-8 ± 12	22 ± 5	19 ± 7	9 ± 8	6 ± 7	-2 ± 42	0 ± 61	13 ± 10	-9 ± 11	3 ± 77
$M_z \pm \sigma$	-12 ± 69	-12 ± 69	-10 ± 8	0 ± 48	-15 ± 3	2 ± 8	9 ± 37	-8 ± 12	22 ± 5	19 ± 7	9 ± 8	6 ± 7	-2 ± 42	0 ± 61	13 ± 10	-9 ± 11	3 ± 77
$F_x \pm \sigma$	6 ± 12	-24 ± 7	-10 ± 8	0 ± 48	-15 ± 3	2 ± 8	9 ± 37	-8 ± 12	22 ± 5	19 ± 7	9 ± 8	6 ± 7	-2 ± 42	0 ± 61	13 ± 10	-9 ± 11	3 ± 77
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 7	-24 ± 7	-10 ± 8	0 ± 48	-15 ± 3	2 ± 8	9 ± 37	-8 ± 12	22 ± 5	19 ± 7	9 ± 8	6 ± 7	-2 ± 42	0 ± 61	13 ± 10	-9 ± 11	3 ± 77
$M_z \pm \sigma$	-12 ± 69	-12 ± 69	-10 ± 8	0 ± 48	-15 ± 3	2 ± 8	9 ± 37	-8 ± 12	22 ± 5	19 ± 7	9 ± 8	6 ± 7	-2 ± 42	0 ± 61	13 ± 10	-9 ± 11	3 ± 77
$F_x \pm \sigma$	8 ± 12	-24 ± 5	-8 ± 8	7 ± 48	-16 ± 3	-10 ± 7	11 ± 51	10 ± 3	24 ± 4	19 ± 7	8 ± 9	8 ± 7	-2 ± 43	10 ± 40	13 ± 11	-14 ± 12	1 ± 80
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 5	-24 ± 7	-8 ± 8	7 ± 48	-16 ± 3	-10 ± 7	11 ± 51	10 ± 3	24 ± 4	19 ± 7	8 ± 9	8 ± 7	-2 ± 43	10 ± 40	13 ± 11	-14 ± 12	1 ± 80
$M_z \pm \sigma$	-6 ± 66	-12 ± 69	-8 ± 8	7 ± 48	-16 ± 3	-10 ± 7	11 ± 51	10 ± 3	24 ± 4	19 ± 7	8 ± 9	8 ± 7	-2 ± 43	10 ± 40	13 ± 11	-14 ± 12	1 ± 80

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
$F_x \pm \sigma$	9 ± 15	4 ± 13	5 ± 16	6 ± 14	7 ± 12	8 ± 10	9 ± 9	10 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-9 ± 14	-25 ± 6	-8 ± 15	-27 ± 7	-23 ± 6	-13 ± 64	-16 ± 70	-6 ± 9
$M_z \pm \sigma$	14 ± 86	11 ± 102	11 ± 102	-11 ± 75	-13 ± 64	-13 ± 64	-13 ± 64	-13 ± 64
$F_x \pm \sigma$	4 ± 13	-6 ± 12	-6 ± 12	-11 ± 10	-8 ± 8	-6 ± 9	-8 ± 8	-6 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-18 ± 10	-16 ± 9	-16 ± 9	-15 ± 4	-12 ± 5	-14 ± 3	-12 ± 5	-14 ± 3
$M_z \pm \sigma$	13 ± 65	11 ± 63	11 ± 63	10 ± 59	4 ± 57	16 ± 65	4 ± 57	16 ± 65
$F_x \pm \sigma$	-15 ± 2	-14 ± 3	-14 ± 3	-13 ± 3	-14 ± 3	-14 ± 3	-14 ± 3	-14 ± 3
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 6	-1 ± 6	-1 ± 6	-1 ± 6	-3 ± 7	-2 ± 7	-3 ± 7	-2 ± 7
$M_z \pm \sigma$	4 ± 32	3 ± 27	3 ± 27	4 ± 28	6 ± 37	8 ± 37	6 ± 37	8 ± 37
$F_x \pm \sigma$	8 ± 3	7 ± 2	7 ± 2	8 ± 3	8 ± 4	10 ± 3	8 ± 4	10 ± 3
$F_y \pm \sigma$	20 ± 3	19 ± 3	19 ± 3	22 ± 4	23 ± 4	24 ± 4	23 ± 4	24 ± 4
$M_z \pm \sigma$	-30 ± 58	-29 ± 57	-29 ± 57	-36 ± 66	-38 ± 66	-36 ± 70	-38 ± 66	-36 ± 70
$F_x \pm \sigma$	8 ± 10	7 ± 10	7 ± 10	9 ± 10	7 ± 11	5 ± 9	9 ± 10	7 ± 11
$F_y \pm \sigma$	19 ± 7	16 ± 6	16 ± 6	19 ± 8	19 ± 8	19 ± 6	19 ± 8	19 ± 6
$M_z \pm \sigma$	37 ± 54	37 ± 34	37 ± 34	34 ± 51	41 ± 50	38 ± 46	41 ± 50	38 ± 46
$F_x \pm \sigma$	8 ± 9	12 ± 11	12 ± 11	9 ± 9	10 ± 9	12 ± 10	9 ± 9	12 ± 10
$F_y \pm \sigma$	6 ± 7	6 ± 8	6 ± 8	7 ± 7	6 ± 8	5 ± 7	6 ± 8	5 ± 7
$M_z \pm \sigma$	7 ± 46	1 ± 64	1 ± 64	0 ± 53	1 ± 54	-3 ± 53	1 ± 54	-3 ± 53
$F_x \pm \sigma$	7 ± 9	8 ± 8	8 ± 8	6 ± 8	6 ± 7	6 ± 10	6 ± 8	6 ± 10
$F_y \pm \sigma$	-6 ± 9	-4 ± 10	-4 ± 10	-2 ± 8	-2 ± 6	-2 ± 8	-2 ± 6	-2 ± 8
$M_z \pm \sigma$	7 ± 44	7 ± 52	7 ± 52	8 ± 42	7 ± 35	7 ± 44	7 ± 35	7 ± 44
$F_x \pm \sigma$	7 ± 13	7 ± 12	7 ± 12	5 ± 11	8 ± 13	16 ± 12	5 ± 11	16 ± 12
$F_y \pm \sigma$	-4 ± 13	-4 ± 9	-4 ± 9	-6 ± 11	-8 ± 13	-11 ± 13	-6 ± 11	-11 ± 13
$M_z \pm \sigma$	14 ± 70	-5 ± 69	-5 ± 69	-3 ± 59	-1 ± 78	0 ± 81	-3 ± 59	0 ± 81

Табл. 13. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 8 — «Евразия»

Table 13. Impact of sequentially constructed buildings on 8 — “Eurasia Tower”

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 15	-4 ± 17	-1 ± 15	-4 ± 12	-2 ± 10	-2 ± 10	-2 ± 10	-1 ± 16
$F_y \pm \sigma$	-4 ± 8	-4 ± 8	-4 ± 8	-5 ± 5	-3 ± 4	-3 ± 4	-6 ± 6	-7 ± 8
$M_z \pm \sigma$	-144 ± 165	-141 ± 191	-108 ± 193	-107 ± 76	-122 ± 84	-122 ± 84	-165 ± 93	-166 ± 166
$F_x \pm \sigma$	-5 ± 10	-6 ± 10	-10 ± 9	-6 ± 8	-6 ± 7	-6 ± 7	-5 ± 9	-5 ± 13
$F_y \pm \sigma$	-2 ± 6	-2 ± 6	0 ± 7	-1 ± 6	0 ± 4	0 ± 4	-2 ± 6	2 ± 11
$M_z \pm \sigma$	-73 ± 111	-73 ± 109	-55 ± 114	-46 ± 106	-84 ± 82	-84 ± 82	-108 ± 106	-48 ± 176
$F_x \pm \sigma$	-18 ± 9	-18 ± 9	-19 ± 8	-19 ± 10	-12 ± 8	-12 ± 8	-13 ± 9	-12 ± 9
$F_y \pm \sigma$	6 ± 12	6 ± 11	5 ± 13	5 ± 14	5 ± 10	5 ± 10	3 ± 12	0 ± 9
$M_z \pm \sigma$	229 ± 154	225 ± 168	239 ± 173	227 ± 137	169 ± 131	169 ± 131	199 ± 163	161 ± 134
$F_x \pm \sigma$	-11 ± 10	-12 ± 8	-7 ± 11	-11 ± 11	-11 ± 10	-11 ± 10	-6 ± 13	-7 ± 13
$F_y \pm \sigma$	6 ± 9	9 ± 8	4 ± 8	8 ± 8	6 ± 8	6 ± 8	1 ± 7	4 ± 10
$M_z \pm \sigma$	27 ± 124	9 ± 122	1 ± 133	8 ± 141	14 ± 119	14 ± 119	-10 ± 103	10 ± 128
$F_x \pm \sigma$	-12 ± 9	-11 ± 8	-11 ± 8	-13 ± 9	-11 ± 9	-11 ± 9	-13 ± 14	-12 ± 15
$F_y \pm \sigma$	5 ± 8	5 ± 7	5 ± 8	6 ± 9	4 ± 8	4 ± 8	8 ± 12	10 ± 12
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 114	-10 ± 125	22 ± 122	4 ± 134	-6 ± 124	-6 ± 124	6 ± 137	54 ± 179
$F_x \pm \sigma$	6 ± 9	2 ± 8	4 ± 8	4 ± 10	4 ± 9	4 ± 9	4 ± 9	0 ± 4
$F_y \pm \sigma$	4 ± 11	9 ± 11	8 ± 10	5 ± 11	4 ± 9	4 ± 9	6 ± 8	4 ± 4
$M_z \pm \sigma$	96 ± 66	120 ± 63	119 ± 65	85 ± 67	91 ± 63	91 ± 63	99 ± 67	34 ± 38
$F_x \pm \sigma$	6 ± 8	7 ± 8	9 ± 9	8 ± 7	6 ± 6	6 ± 6	10 ± 8	23 ± 5
$F_y \pm \sigma$	6 ± 12	6 ± 12	3 ± 13	4 ± 11	5 ± 9	5 ± 9	3 ± 14	-10 ± 13
$M_z \pm \sigma$	149 ± 106	148 ± 97	156 ± 112	131 ± 90	140 ± 74	140 ± 74	127 ± 112	110 ± 105
$F_x \pm \sigma$	3 ± 10	2 ± 11	6 ± 11	1 ± 8	3 ± 6	3 ± 6	-1 ± 5	9 ± 7
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 10	0 ± 9	-1 ± 10	-1 ± 6	0 ± 6	0 ± 6	0 ± 4	-9 ± 6
$M_z \pm \sigma$	-30 ± 127	-4 ± 126	-18 ± 108	-26 ± 72	3 ± 75	3 ± 75	-12 ± 59	-10 ± 95

	13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23	
	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)
$F_x \pm \sigma$	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)
$F_y \pm \sigma$	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)
$M_z \pm \sigma$	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)
$F_x \pm \sigma$	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)
$F_y \pm \sigma$	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)
$M_z \pm \sigma$	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)	10(1)	10(2)

Табл. 16. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 11 — «Федерация: Восток»

Table 16. Impact of sequentially constructed buildings on 11 — “Federation Tower: East”

	11		12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		
	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	13 ± 143	0 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-35 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	-19 ± 17	2 ± 15	-142 ± 214	-3 ± 16	2 ± 10	71 ± 201	-2 ± 9	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	13 ± 143	0 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-35 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	-19 ± 17	2 ± 15	-142 ± 214	-3 ± 16	2 ± 10	71 ± 201	-2 ± 9	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	13 ± 143	0 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-35 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	-19 ± 17	2 ± 15	-142 ± 214	-3 ± 16	2 ± 10	71 ± 201	-2 ± 9	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	13 ± 143	0 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-35 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	-19 ± 17	2 ± 15	-142 ± 214	-3 ± 16	2 ± 10	71 ± 201	-2 ± 9	0 ± 8
$F_x \pm \sigma$	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	13 ± 143	0 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-35 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	-19 ± 17	2 ± 15	-142 ± 214	-3 ± 16	2 ± 10	71 ± 201	-2 ± 9	0 ± 8
$F_y \pm \sigma$	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	13 ± 143	0 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-35 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	-19 ± 17	2 ± 15	-142 ± 214	-3 ± 16	2 ± 10	71 ± 201	-2 ± 9	0 ± 8
$M_z \pm \sigma$	7 ± 13	-19 ± 8	-3 ± 15	-25 ± 10	4 ± 16	-25 ± 10	11 ± 20	-26 ± 11	13 ± 143	0 ± 4	2 ± 6	-10 ± 44	-35 ± 17	-4 ± 12	-70 ± 165	-19 ± 17	2 ± 15	-142 ± 214	-3 ± 16	2 ± 10	71 ± 201	-2 ± 9	0 ± 8

Табл. 17. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс зданий 12 (1) — «Neva Towers: Case 1» и 12 (2) — «Neva Towers: Case 2»

Table 17. Impact of sequentially constructed buildings on 12 (1) — “Neva Towers: Case 1” and 12 (2) — “Neva Towers: Case 2”

	12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22	
	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_x \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_y \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$M_z \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_x \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_y \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$M_z \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)

Окончание табл. 17 / End of the Table 17

	13		14		13		14		13		14	
	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_x \pm \sigma$	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)	12(1)	12(2)
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 11	1 ± 8	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9	-26 ± 11	2 ± 9
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5	-6 ± 4	-20 ± 5
$F_x \pm \sigma$	-10 ± 131	-13 ± 71	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74	-11 ± 150	-27 ± 74
$F_y \pm \sigma$	-24 ± 10	2 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2	-22 ± 11	1 ± 2
$M_z \pm \sigma$	0 ± 12	-28 ± 4	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5	0 ± 11	-30 ± 5
$F_x \pm \sigma$	-91 ± 118	-46 ± 124	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132	-111 ± 141	-35 ± 132
$F_y \pm \sigma$	-11 ± 10	-6 ± 11	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10	-10 ± 14	-6 ± 10
$M_z \pm \sigma$	-1 ± 8	5 ± 15	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17	1 ± 9	6 ± 17
$F_x \pm \sigma$	-20 ± 103	9 ± 115	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150	13 ± 129	25 ± 150
$F_y \pm \sigma$	-8 ± 10	-1 ± 11	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8	-6 ± 10	-1 ± 8
$M_z \pm \sigma$	0 ± 7	5 ± 18	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12	0 ± 7	8 ± 12
$F_x \pm \sigma$	-16 ± 100	-22 ± 141	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97	-10 ± 101	16 ± 97
$F_y \pm \sigma$	-3 ± 11	-1 ± 11	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7	0 ± 12	-2 ± 7
$M_z \pm \sigma$	1 ± 6	9 ± 17	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13	3 ± 7	3 ± 13
$F_x \pm \sigma$	18 ± 75	-12 ± 133	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98	17 ± 78	10 ± 98
$F_y \pm \sigma$	19 ± 8	-5 ± 9	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10	19 ± 8	-4 ± 10
$M_z \pm \sigma$	10 ± 5	4 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15	11 ± 6	6 ± 15
$F_x \pm \sigma$	91 ± 54	65 ± 109	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96	96 ± 57	60 ± 96
$F_y \pm \sigma$	23 ± 7	7 ± 7	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5	22 ± 5	6 ± 5
$M_z \pm \sigma$	4 ± 9	1 ± 19	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15	4 ± 8	1 ± 15
$F_x \pm \sigma$	42 ± 86	2 ± 107	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102	42 ± 75	9 ± 102
$F_y \pm \sigma$	12 ± 6	9 ± 4	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5	11 ± 6	9 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-7 ± 5	-16 ± 8	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9	-9 ± 5	-17 ± 9
$F_x \pm \sigma$	-38 ± 49	57 ± 57	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63	-37 ± 53	57 ± 63

Табл. 18. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс зданий 13 (1) — «Moscow Towers: Case 1» и 13 (2) — «Moscow Towers: Case 2»

Table 18. Impact of sequentially constructed buildings on 13 (1) — “Moscow Towers: Case 1” and 13 (2) — “Moscow Towers: Case 2”

	13		14		13		14		13		14	
	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)	13(1)	13(2)
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 10	12 ± 3	0 ± 9	10 ± 8	-2 ± 10	12 ± 3	0 ± 9	10 ± 8	-2 ± 10	12 ± 3	0 ± 9	10 ± 8
$F_y \pm \sigma$	-18 ± 12	-13 ± 4	-15 ± 13	-7 ± 5	-18 ± 12	-13 ± 4	-15 ± 13	-7 ± 5	-18 ± 12	-13 ± 4	-15 ± 13	-7 ± 5
$M_z \pm \sigma$	107 ± 210	-315 ± 57	-36 ± 172	-361 ± 114	107 ± 210	-315 ± 57	-36 ± 172	-361 ± 114	107 ± 210	-315 ± 57	-36 ± 172	-361 ± 114
$F_x \pm \sigma$	1 ± 10	-6 ± 2	2 ± 12	-9 ± 4	1 ± 10	-6 ± 2	2 ± 12	-9 ± 4	1 ± 10	-6 ± 2	2 ± 12	-9 ± 4
$F_y \pm \sigma$	-30 ± 10	0 ± 3	-34 ± 11	-3 ± 5	-30 ± 10	0 ± 3	-34 ± 11	-3 ± 5	-30 ± 10	0 ± 3	-34 ± 11	-3 ± 5
$M_z \pm \sigma$	-135 ± 163	161 ± 44	-184 ± 188	-17 ± 40	-135 ± 163	161 ± 44	-184 ± 188	-17 ± 40	-135 ± 163	161 ± 44	-184 ± 188	-17 ± 40
$F_x \pm \sigma$	-3 ± 2	-30 ± 6	-3 ± 1	-19 ± 3	-3 ± 2	-30 ± 6	-3 ± 1	-19 ± 3	-3 ± 2	-30 ± 6	-3 ± 1	-19 ± 3
$F_y \pm \sigma$	2 ± 2	22 ± 13	0 ± 2	8 ± 6	2 ± 2	22 ± 13	0 ± 2	8 ± 6	2 ± 2	22 ± 13	0 ± 2	8 ± 6
$M_z \pm \sigma$	31 ± 26	91 ± 230	8 ± 23	24 ± 128	31 ± 26	91 ± 230	8 ± 23	24 ± 128	31 ± 26	91 ± 230	8 ± 23	24 ± 128
$F_x \pm \sigma$	-16 ± 10	-1 ± 18	-14 ± 7	9 ± 13	-16 ± 10	-1 ± 18	-14 ± 7	9 ± 13	-16 ± 10	-1 ± 18	-14 ± 7	9 ± 13
$F_y \pm \sigma$	36 ± 9	-4 ± 13	29 ± 6	-12 ± 9	36 ± 9	-4 ± 13	29 ± 6	-12 ± 9	36 ± 9	-4 ± 13	29 ± 6	-12 ± 9
$M_z \pm \sigma$	337 ± 136	-101 ± 347	350 ± 114	-116 ± 135	337 ± 136	-101 ± 347	350 ± 114	-116 ± 135	337 ± 136	-101 ± 347	350 ± 114	-116 ± 135
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 10	2 ± 16	-2 ± 10	2 ± 14	-2 ± 10	2 ± 16	-2 ± 10	2 ± 14	-2 ± 10	2 ± 16	-2 ± 10	2 ± 14
$F_y \pm \sigma$	17 ± 18	-2 ± 13	16 ± 20	-3 ± 9	17 ± 18	-2 ± 13	16 ± 20	-3 ± 9	17 ± 18	-2 ± 13	16 ± 20	-3 ± 9
$M_z \pm \sigma$	23 ± 238	-92 ± 215	33 ± 209	-95 ± 195	23 ± 238	-92 ± 215	33 ± 209	-95 ± 195	23 ± 238	-92 ± 215	33 ± 209	-95 ± 195
$F_x \pm \sigma$	0 ± 6	0 ± 9	-1 ± 5	0 ± 7	0 ± 6	0 ± 9	-1 ± 5	0 ± 7	0 ± 6	0 ± 9	-1 ± 5	0 ± 7
$F_y \pm \sigma$	6 ± 11	1 ± 7	7 ± 12	0 ± 7	6 ± 11	1 ± 7	7 ± 12	0 ± 7	6 ± 11	1 ± 7	7 ± 12	0 ± 7
$M_z \pm \sigma$	-33 ± 146	-24 ± 114	-42 ± 161	-7 ± 138	-33 ± 146	-24 ± 114	-42 ± 161	-7 ± 138	-33 ± 146	-24 ± 114	-42 ± 161	-7 ± 138
$F_x \pm \sigma$	-1 ± 7	8 ± 11	7 ± 1	5 ± 9	-1 ± 7	8 ± 11	7 ± 1	5 ± 9	-1 ± 7	8 ± 11	7 ± 1	5 ± 9
$F_y \pm \sigma$	-1 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 15	0 ± 11	-1 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 15	0 ± 11	-1 ± 12	-6 ± 13	-3 ± 15	0 ± 11
$M_z \pm \sigma$	44 ± 148	49 ± 191	40 ± 181	116 ± 200	44 ± 148	49 ± 191	40 ± 181	116 ± 200	44 ± 148	49 ± 191	40 ± 181	116 ± 200
$F_x \pm \sigma$	-2 ± 9	47 ± 15	-3 ± 10	20 ± 16	-2 ± 9	47 ± 15	-3 ± 10	20 ± 16	-2 ± 9	47 ± 15	-3 ± 10	20 ± 16
$F_y \pm \sigma$	24 ± 34	-35 ± 21	6 ± 22	-7 ± 16	24 ± 34	-35 ± 21	6 ± 22	-7 ± 16	24 ± 34	-35 ± 21	6 ± 22	-7 ± 16
$M_z \pm \sigma$	317 ± 379	-158 ± 274	160 ± 303	102 ± 221	317 ± 379	-158 ± 274	160 ± 303	102 ± 221	317 ± 379	-158 ± 274	160 ± 303	102 ± 221

Табл. 19. Влияние последовательно возводимых зданий на комплекс 14 — «One Tower»

Table 19. Impact of sequentially constructed buildings on 14 — “One Tower”

14	0°			45°			90°			135°			180°			225°			270°			315°		
	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$	$F_x \pm \sigma$	$F_y \pm \sigma$	$M_z \pm \sigma$
	11 ± 9	-25 ± 6	-64 ± 133	1 ± 4	-21 ± 7	145 ± 105	-3 ± 7	16 ± 13	-113 ± 382	-5 ± 13	23 ± 16	-173 ± 334	0 ± 8	7 ± 11	-94 ± 187	2 ± 7	10 ± 16	-94 ± 300	8 ± 11	-6 ± 23	-109 ± 350	12 ± 6	-45 ± 14	229 ± 137

скорость потока; S — миделевое сечение (проекция здания вдоль фронта ветра), m^2 .

Площади миделевых сечений для выбранных зданий и сооружений представлены в табл. 20.

На рис. 17 приведены лепестковые диаграммы равнодействующего аэродинамического коэффициента C_R комплексов ММДЦ «Москва-Сити»: «Федерация: Запад», «Меркурий», «ОКО: Северная башня», «Эволюция» и «Евразия».

Возникающий среди зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити» эффект аэродинамической интерференции в среднем приводит к уменьшению аэродинамического коэффициента средней составляющей ветровой нагрузки и увеличению пульсаций.

На основе табл. 6–19 и лепестковых диаграмм можно определить наиболее опасные углы атаки ветра, приводящие к усилению ветрового воздействия, по сравнению с изолированным зданием, а также направления ветров, способствующие возникновению эффекта ветрового экранирования:

- для здания «Федерация: Запад» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «ОКО: Северная башня» и «Федерация: Восток», уменьшив значение на 83,5 % при угле атаки 315° и 76,9 % при угле атаки 0° соответственно. Возведе-

ние башен «Эволюция» и «Империя» внесло вклад в рост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 88,6 % при угле атаки 135° и 70,3 % при угле атаки 90° соответственно;

- для здания «Меркурий» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «ОКО: Северная башня» и «Эволюция», уменьшив значение на 52,6 % при угле атаки 270° и 41,3 % при угле атаки 135° соответственно. Прирост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 83,3 и 45,9 % при угле атаки 315° обусловлен возведением высоток «Евразия» и «Neva Towers» соответственно;

- для здания «ОКО: Северная башня» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «Neva Towers» и «ОКО: Южная башня», уменьшив значение на 81,1 % при угле атаки 0° и 64,1 % при угле атаки 225° соответственно. Возведение высотного здания «ОКО: Южная башня» внесло вклад в рост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 177,9 % при угле атаки 225°, а также ее уменьшение на 43,8 % при угле атаки 45°;

- для здания «Эволюция» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплексов «Moscow

Табл. 20. Проекция здания вдоль фронта ветра (миделевое сечение)

Table 20. Building projection along wind front (midsection)

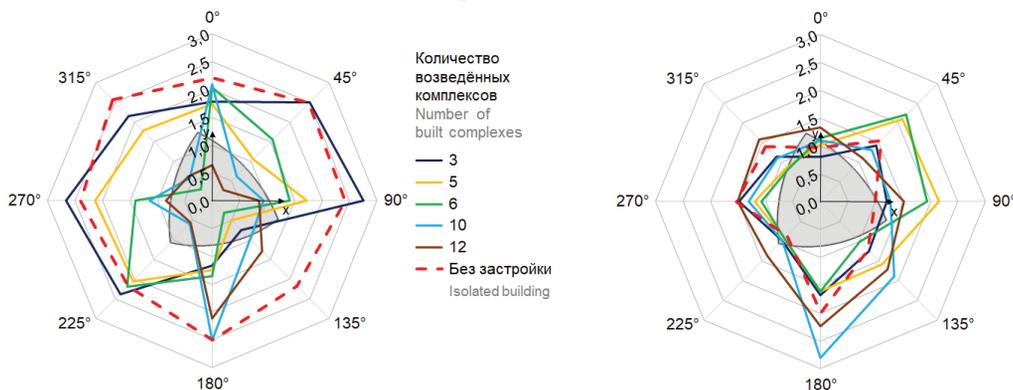
Здание / Угол атаки ветра Building / Angle of wind attack	Миделевое сечение S, m^2 Midsection S, m^2			
	0/180°	45/225°	90/270°	135/315°
2 — «Федерация: Запад» 2 — “Federation: West”	192	207	197	186
5 — «Меркурий» 5 — “Mercury City Tower”	210	266	258	184
6 — «ОКО: Северная башня» 6 — “OKO: North Tower”	202	181	213	210
7 — «Эволюция» 7 — “Evolution Tower”	176	137	176	137
8 — «Евразия» 8 — “Eurasia Tower”	181	147	210	237

Towers» и «Федерация: Восток», уменьшив значения на 65,9 % при угле атаки 0° и 41,7 % при угле атаки 315° соответственно. Прирост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 159,9 % при угле атаки 135° и 40,2 % при угле атаки 0° обу-

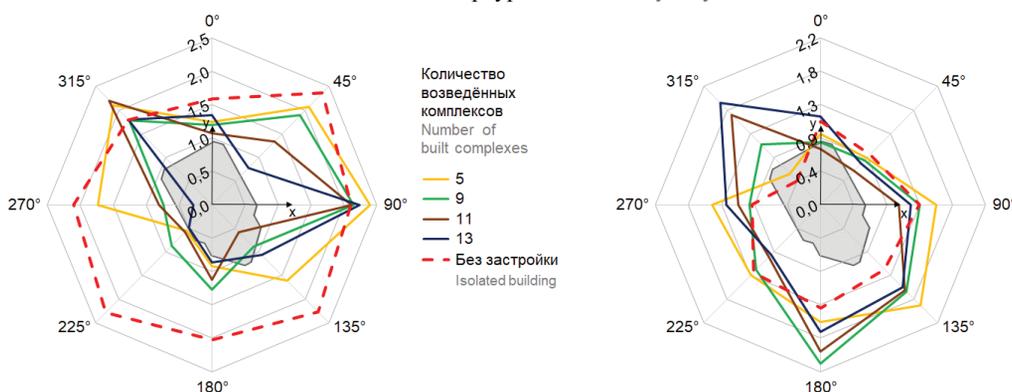
словлен возведением высоток «Евразия» и «Moscow Towers» соответственно;

- для здания «Евразия» наибольшее влияние на среднюю составляющую ветрового воздействия оказало строительство комплекса «ОКО: Южная

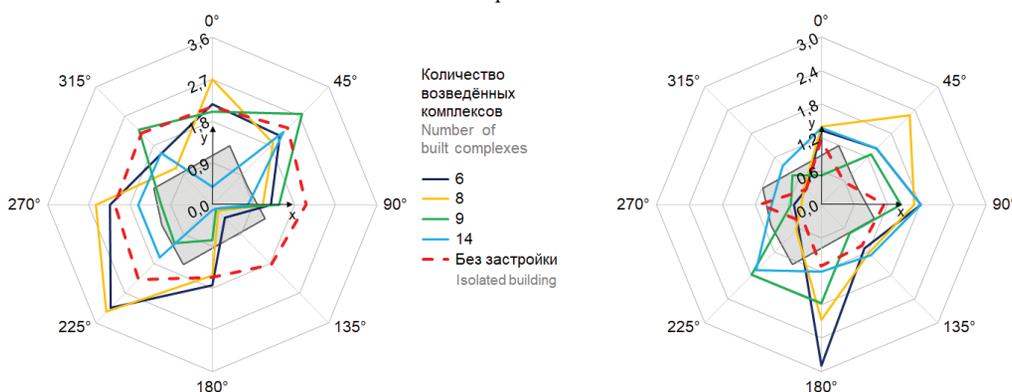
2 — «Федерация: Запад» / “Federation: West”



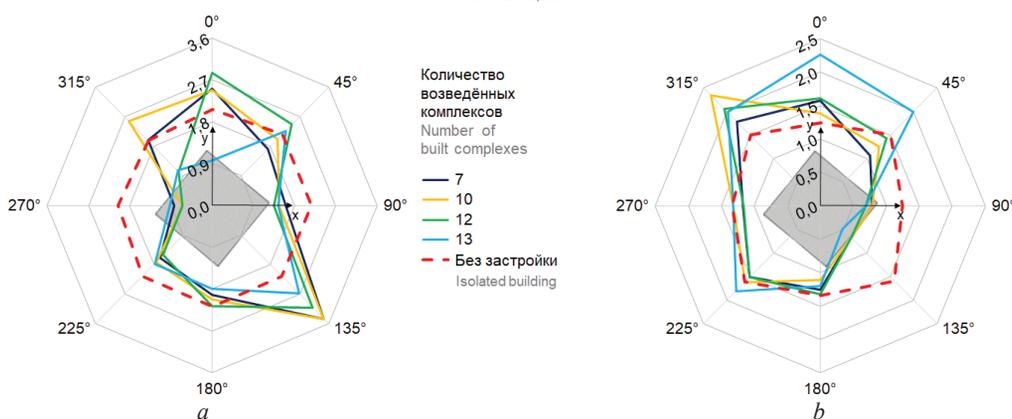
5 — «Меркурий» / “Mercury City Tower”



6 — «ОКО: Северная башня» / “OKO: North Tower”



7 — «Эволюция» / “Evolution Tower”



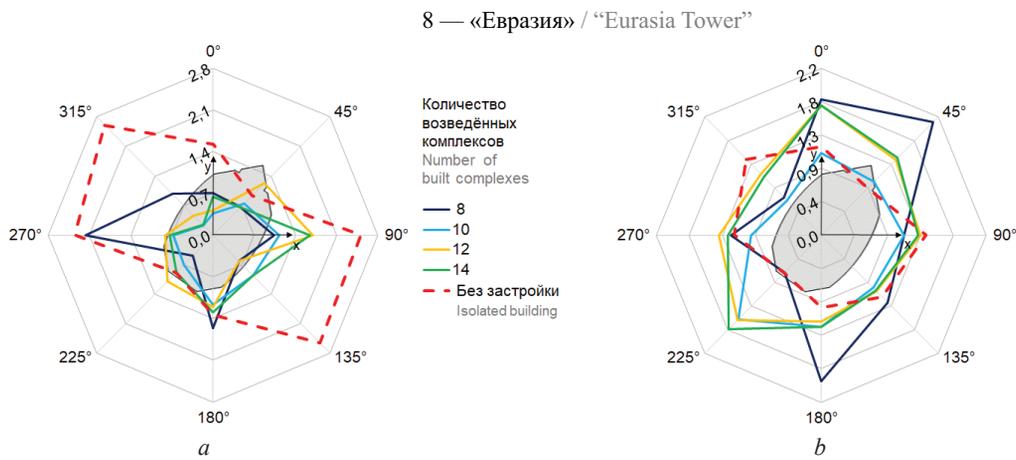


Рис. 17. Диаграммы аэродинамического коэффициента C_R комплексов ММДЦ «Москва-Сити»: a — коэффициент \bar{C}_R средней составляющей ветрового воздействия; b — коэффициент C'_R пульсационной составляющей ветрового воздействия

Fig. 17. Diagrams of aerodynamic coefficient C_R of the MIBC “Moscow-City”: a — coefficient \bar{C}_R of the averaged component of wind action; b — coefficient C'_R of the pulsation component of wind action

башня», уменьшив значение на 92,1 и 58,4 % при углах атаки 315 и 270° соответственно. Возведение высотного здания «ОКО: Южная башня» внесло вклад в рост пульсационной составляющей ветрового воздействия на 112,9 % при угле атаки 225°, а также ее уменьшение на 36,5 % при угле атаки 45°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнено численное аэродинамическое моделирование влияния последовательного возведения зданий ММДЦ «Москва-Сити» на аэродинамическую интерференцию. На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

Разработаны, верифицированы и валидированы квазидвухмерные расчетные аэродинамические модели зданий комплекса ММДЦ «Москва-Сити» на основе численного моделирования нестационарных нелинейных уравнений Навье – Стокса, реализованные в ПК ANSYS Fluent, с целью определения влияния последовательного возведения высотных зданий на аэродинамическую интерференцию.

Для комплекса ММДЦ «Москва-Сити» на момент проектирования исследования аэродинамической интерференции проводились только для проектируемых зданий и сооружений с учетом окружающей актуальной и перспективной застройки без расчетных исследований их влияния на уже построенные здания. В настоящей статье на основе расчетного анализа последовательного возведения комплексов зданий ММДЦ «Москва-Сити» показана важность учета аэродинамической интерференции, влияющей на уже построенные здания.

Аэродинамическая интерференция приводит как к эффектам ветрового экранирования, когда влияние окружающей застройки снижает ветровое воздействие на рассматриваемое здание, так и к эффектам усиления ветра, вызванного дополнительными срывами вихрей с близстоящих зданий, и эффектам ускорения ветра из-за сквозного прохода воздушно-го потока между зданиями.

Построены лепестковые диаграммы (при разных углах атаки ветра) аэродинамических коэффициентов средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия для зданий: «Федерация: Запад», «Меркурий», «ОКО: Северная башня», «Эволюция» и «Евразия» в зависимости от количества возведенных комплексов. По результатам определены наиболее опасные углы атаки ветра, приводящие к эффектам усиления ветрового воздействия по сравнению с отдельностоящим зданием.

При планировании и развитии городской застройки посредством возведения новых зданий важно учесть не только результаты аэродинамических исследований, определяющих интерференцию новых строений с окружающей застройкой, но и их влияние на существующие здания и сооружения. На примере последовательного возведения комплекса ММДЦ «Москва-Сити» продемонстрировано, что строительство новых зданий способно привести к значительному изменению аэродинамики уже построенных зданий, что требуется учитывать при проектировании. Использование подходов, основанных на численном моделировании, позволит выполнять подобные расчетные исследования с достаточной степенью точности и обосновать степень влияния нового строительства на существующие здания, тем самым обеспечив их механическую безопасность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства : учебное пособие. М. : АСВ, 2017. 720 с.
2. Гузев А., Корнилов Д., Короткин А., Соловьев С. Аэродинамические испытания высотных зданий и сооружений // Высотные здания. 2015. № 1. С. 102–105.
3. Kar R., Dalui S.K. Wind interference effect of neighbouring square buildings in rhombic arrangement on an octagonal building // ASPS Conference Proceedings. 2022. Vol. 1. Issue 1. Pp. 1463–1469. DOI: 10.38208/acp.v1.677
4. Zu G., Lam K. LES and wind tunnel test of flow around two tall buildings in staggered arrangement // Computation. 2018. Vol. 6. Issue 2. P. 28. DOI: 10.3390/computation6020028
5. Sanyal P. AELH-, CFD-, and ANN-based wind interference zone prediction of regular tall buildings // Asian Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 24. Issue 8. Pp. 3881–3891. DOI: 10.1007/s42107-023-00683-5
6. Gurjar S., Amin J.A. Numerical simulation of Wind induced mean interference between two tall buildings // Journal of Materials and Engineering Structures. 2017. No. 4. Pp. 181–192.
7. Cui H., An H., Ma M., Han Z., Saha S.C., Liu Q. Experimental study on wind load and wind-induced interference effect of three high-rise buildings // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2023. Vol. 16. Issue 11. DOI: 10.47176/jafm.16.11.1897
8. Wu X., Sun Y., Wu Y., Su N., Peng S. The interference effects of wind load and wind-induced dynamic response of quayside container cranes // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 21. P. 10969. DOI: 10.3390/app122110969
9. Khanduri A.C. Wind-induced interference effects on buildings-integrating experimental and computerized approaches: a thesis doctor of philosophy. Canada, 1997. 334 p.
10. Гамбал С., Стоянов С. Аэродинамика высотных зданий // Высотные здания. 2006. № 1. С. 52–53.
11. Ekici E. Plot 17–18 project: tall building design in “Moscow-City” // CTBUH 2016 Shenzhen, Guangzhou, Hong Kong Conference. 2016. Pp. 1314–1321.
12. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик расчета ветровых воздействий и исследование реальных объектов // Вестник МГСУ. 2010. № 4–5. С. 182–185. EDN RTUJSB.
13. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 198 с. EDN QEVMND.
14. Белостоцкий А.М., Негрцова И.Ю., Горячевский О.С. Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 11. С. 1745–1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762
15. Горячевский О.С. Численное моделирование ветровых давлений на окна. Валидация для типового многоэтажного здания квадратной формы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. № 19 (3). С. 114–129. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-3-114-129
16. Попов Н.А. Проведение комплекса работ по статистическому и графическому анализу результатов модельных испытаний в аэродинамической трубе здания, возводимого на участках № 2–3 ММДЦ «Москва-Сити», и прилегающих пешеходных зонах. М. : Эталон-Проект, 2007. 85 с.
17. Попов Н.А. Рекомендации по назначению расчетных ветровых нагрузок, в соответствии с требованиями российских норм расчетных ветровых нагрузок, действующих на здание, возводимое на участках № 2–3 «ММДЦ Москва-Сити». М. : ЦНИИСК им. Кучеренко, 2007. 51 с.
18. Wang X., Zhang G., Li Y., Kong H., Liu L., Zhang C. Field measurements of wind-induced responses of the shanghai world financial center during super typhoon Lekima // Sensors. 2023. Vol. 23. Issue 14. P. 6519. DOI: 10.3390/s23146519
19. Yi J., Li Q.S. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building // Journal of Fluids and Structures. 2015. Vol. 58. Pp. 236–253. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.08.005
20. Charisi S., Thiis T.K., Aurlien T. Full-scale measurements of wind-pressure coefficients in twin medium-rise buildings // Buildings. 2019. Vol. 9. Issue 3. P. 63. DOI: 10.3390/buildings9030063
21. Lee B.E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism // Journal of Fluid Mechanics. 1975. Vol. 69. Issue 2. Pp. 263–282. DOI: 10.1017/S0022112075001437
22. Bearman P.W., Obasaju E.D. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 1982. Vol. 119. Pp. 297–321. DOI: 10.1017/S0022112082001360
23. Tamura T., Ono Y. LES analysis on aeroelastic instability of prisms in turbulent flow // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2003. Vol. 91. Issue 12–15. Pp. 1827–1846. DOI: 10.1016/j.jweia.2003.09.032

24. Du X., Shi D., Dong H., Liu Y. Flow around square-like cylinders with corner and side modifications // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021. Vol. 215. P. 104686. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104686

25. Cao W., Wang X., Liu Y., Yin Y., Yang J., An J. Large eddy simulation on wind-induced interference effects of staggered chamfered square cylinders // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-023-44711-5

Поступила в редакцию 8 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 22 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 22 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Гургенович Саиян — младший научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова), преподаватель кафедры информатики и прикладной математики, преподаватель кафедры общей и прикладной физики, аспирант кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ResearcherID: AAT-1424-2021, ORCID: 0000-0003-0694-4865; Berformert@gmail.com;

Александра Михайловна Ефимова — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; sasha.basket.8@yandex.ru.

Вклад авторов:

Саиян С.Г. — научное руководство, концепция исследования, методология исследования, анализ результатов исследования, написание текста статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Ефимова А.М. — сбор и анализ материалов по ММДЦ «Москва-Сити», проведение CFD-моделирования, создание иллюстраций, обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Afanasyeva I.N. *Computational aerodynamics in construction problems : textbook*. Moscow, ASV, 2017; 720. (rus.).
2. Guzeyev A., Kornilov D., Korotkin A., Solovyev S. Aerodynamic testing of high-rise buildings and structures. *High-rise buildings*. 2015; 1:102-105. (rus.).
3. Kar R., Dalui S.K. Wind interference effect of neighbouring square buildings in rhombic arrangement on an octagonal building. *ASPS Conference Proceedings*. 2022; 1(1):1463-1469. DOI: 10.38208/acp.v1.677
4. Zu G., Lam K. LES and wind tunnel test of flow around two tall buildings in staggered arrangement. *Computation*. 2018; 6(2):28. DOI: 10.3390/computation6020028
5. Sanyal P. AELH-, CFD-, and ANN-based wind interference zone prediction of regular tall buildings. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023; 24(8):3881-3891. DOI: 10.1007/s42107-023-00683-5
6. Gurjar S., Amin J.A. Numerical simulation of wind induced mean interference between two tall buildings. *Journal of Materials and Engineering Structures*. 2017; 4:181-192.
7. Cui H., An H., Ma M., Han Z., Saha S.C., Liu Q. Experimental study on wind load and wind-induced interference effect of three high-rise buildings. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2023; 16(11). DOI: 10.47176/jafm.16.11.1897
8. Wu X., Sun Y., Wu Y., Su N., Peng S. The interference effects of wind load and wind-induced dynamic response of quayside container cranes. *Applied Sciences*. 2022; 12(21):10969. DOI: 10.3390/app122110969
9. Khanduri A.C. *Wind-induced interference effects on buildings-integrating experimental and computerized approaches : a thesis doctor of philosophy*. Canada, 1997; 334.
10. Gambal S., Stoyanov S. Aerodynamics of high-rise buildings. *High-rise buildings*. 2006; 1:52-53. (rus.).
11. Ekici E. *Plot 17–18 project: tall building design in “Moscow-City”*. CTBUH 2016 Shenzhen, Guangzhou, Hong Kong Conference. 2016; 1314-1321.
12. Belostotsky A.M., Dubinsky S.I., Afanasyeva I.N. Numerical simulation in civil aerodynamics. Development of methodology of calculation of wind effects and study of real object. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2010; 4-5:182-185. EDN RTUJSB. (rus.).
13. Dubinskiy S.I. *Numerical modeling of wind effects on high-rise buildings : diss. ... Ph.D.* Moscow, 2010; 198. EDN QEVMND. (rus.).
14. Belostotsky A.M., Negrozova I.Yu., Goryachevsky O.S. Estimation of aeroelastic stability of a tower spire. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(11):1745-1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762 (rus.).

15. Goryachevsky O. Numerical modelling of wind loads on windows. Validation for a high-rise square plan building. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023; 19(3):114-129. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-3-114-129 (rus.).
16. Popov N.A. *Carrying out a set of works on statistical and graphical analysis of the results of model tests in the wind tunnel of the building to be erected on sites No. 2-3 of Moscow-City MMDC and adjacent pedestrian zones*. Moscow, Etalon-Project, 2007; 85. (rus.).
17. Popov N.A. *Recommendations on assignment of design wind loads, in accordance with the requirements of the Russian norms of design wind loads acting on the building being erected on sites No. 2-3 of MIBC "Moscow-City"*. Москва, TsNIISK named after Kucherenko, 2007; 51. (rus.).
18. Wang X., Zhang G., Li Y., Kong H., Liu L., Zhang C. Field measurements of wind-induced responses of the shanghai world financial center during super typhoon Lekima. *Sensors*. 2023; 23(14):6519. DOI: 10.3390/s23146519
19. Yi J., Li Q.S. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building. *Journal of Fluids and Structures*. 2015; 58:236-253. DOI: 10.1016/j.jfluidstruct.2015.08.005
20. Charisi S., Thiis T.K., Aurlien T. Full-scale measurements of wind-pressure coefficients in twin medium-rise buildings. *Buildings*. 2019; 9(3):63. DOI: 10.3390/buildings9030063
21. Lee B.E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism. *Journal of Fluid Mechanics*. 1975; 69(2):263-282. DOI: 10.1017/S0022112075001437
22. Bearman P.W., Obasaju E.D. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*. 1982; 119:297-321. DOI: 10.1017/S0022112082001360
23. Tamura T., Ono Y. LES analysis on aeroelastic instability of prisms in turbulent flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003; 91(12-15):1827-1846. DOI: 10.1016/j.jweia.2003.09.032
24. Du X., Shi D., Dong H., Liu Y. Flow around square-like cylinders with corner and side modifications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021; 215:104686. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104686
25. Cao W., Wang X., Liu Y., Yin Y., Yang J., An J. Large eddy simulation on wind-induced interference effects of staggered chamfered square cylinders. *Scientific Reports*. 2023; 13(1). DOI: 10.1038/s41598-023-44711-5

Received February 8, 2024.

Adopted in revised form on March 22, 2024.

Approved for publication on March 22, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey G. Saiyan** — junior researcher at the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova, lecturer of the Department of Informatics and Applied Mathematics, lecturer of the Department of General and Applied Physics, 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; ID RSCI: 987238, Scopus: 57195230884, ResearcherID: AAT-1424-2021, ORCID: 0000-0003-0694-4865; Berformert@gmail.com;

Alexandra M. Efimova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; sasha.basket.8@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Sergey G. Saiyan — scientific guidance, research concept, research methodology, analysis of research results, writing the text of the article, scientific editing of the text, final conclusions.

Alexandra M. Efimova — collection and analysis of materials on MIBC "Moscow-City", CFD modeling, creation of illustrations, processing and analysis of research results, writing the text of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Быстрособорные узлы в стальных каркасах многоэтажных зданий

Александр Романович Туснин, Иван Владимирович Мыльников

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях развития стального строительства актуальным видится создание номенклатуры типовых унифицированных изделий, узлов и деталей стальных каркасов, что позволит проектировщикам при меньших трудовых затратах создавать проекты современных быстровозводимых зданий, а строителям — быстро и качественно воплощать их в жизнь. Рассматриваются узлы стыка колонн по высоте и сопряжения их с балками перекрытия. В приведенных конструктивных решениях усилия передаются непосредственным упором контактных поверхностей соединяемых элементов, что дает возможность избежать выполнения монтажных сварных швов и большого количества болтовых соединений. Как следствие, при использовании контактных соединений сокращаются сроки монтажа металлического каркаса и снижается стоимость строительства.

Материалы и методы. При рассмотрении контактных задач не применим принцип Сен-Венана, важно исследовать непосредственные области контактных поверхностей элементов. Разработка узлов велась на примере типового каркаса пятиэтажного здания с размерами ячеек от 3×3 до 6×6 м с конструктивными элементами заданных сечений.

Результаты. Представлены возможные контактные соединения элементов каркаса, позволяющие осуществлять монтаж только их установкой друг на друга и финишной регулировкой. Такие соединения за счет работы контактирующих поверхностей на смятие позволяют передавать не только продольные усилия, но и некоторую часть изгибающих моментов. Приведен численный расчет одного из предложенных узлов.

Выводы. Предложенные варианты узлов стыка колонн и примыкания балки к колонне являются нетиповыми и ранее не используемыми в инженерной практике. Для широкого применения таких узлов в практике проектирования стальных каркасов многоэтажных зданий необходимо всесторонне исследовать их несущую способность и деформативность. Интерес представляет изучение влияния геометрических параметров соединительных элементов на жесткость узлов и на напряженно-деформированное состояние каркаса в целом. Настоящие исследования будут проводиться с использованием программно-вычислительных комплексов и эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: быстровозводимые здания, стальной каркас, контактные соединения, быстрособорные узлы, стык колонн, примыкание балки к колонне

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р., Мыльников И.В. Быстрособорные узлы в стальных каркасах многоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 942–959. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.942-959

Автор, ответственный за переписку: Александр Романович Туснин, tusninar@mgsu.ru.

Quick-assembly units in steel frames of multi-storey buildings

Alexander R. Tusnin, Ivan V. Myl'nikov

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

ABSTRACT

Introduction. In the conditions of steel construction development, it is relevant to create a nomenclature of standard unified products, assemblies and parts of steel frames, which will allow engineers to create projects of modern prefabricated buildings with less labour costs, and builders to implement them quickly and efficiently. The joints of the column junction in height and their coupling with the floor beams are considered. In these design solutions, the forces are transmitted by direct contact of the end surfaces of the connected elements, which avoids the execution of mounting welds and a large number of bolted connections. As a result, when using contact connections, the installation time and the cost of construction of the metal frame are reduced.

Materials and methods. When considering contact problems, the Saint-Venant principle is not applicable, it is important to explore the immediate areas of the contact surfaces of the elements. The nodes were developed using the example of a typical frame of a five-storey building with cell sizes from 3×3 to 6×6 m with structural elements of specified sections.

Results. The possible contact connections of the frame elements are presented, which allow assembly only by installing them on top of each other and finishing adjustment. Such connections, due to the work of the contact surfaces on the crumple, allow transmitting not only longitudinal forces, but also some of the bending moments.

Conclusions. The proposed options for column joints and beam-to-column junctions are non-typical and not previously used in engineering practice. For the widespread use of such units in the practice of designing steel frames of multi-storey

buildings, it is necessary to investigate their bearing capacity and deformability comprehensively. It is of interest to study the influence of the geometric parameters of the connecting elements on the stiffness of the nodes and on the stress-strain state of the frame as a whole. The present research will be conducted using computer software and experiment.

KEYWORDS: prefabricated buildings, steel frame, contact joints, quick-assembly units, column joint, beam-to-column connectio

FOR CITATION: Tusnin A.R., Myl'nikov I.V. Quick-assembly units in steel frames of multi-storey buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):942-959. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.942-959 (rus.).

Corresponding author: Aleksander R. Tusnin, tusninar@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации стальные конструкции в основном применяются в промышленном строительстве, мостах и уникальных большепролетных и высотных зданиях. В многоэтажных зданиях массовой городской застройки стальные конструкции используются недостаточно широко [1]. По данным Steel Construction Institute, в Великобритании на стальном каркасе строят до 70 % многоэтажных зданий, в Швеции — около 65, в Норвегии — 48 [2–4]. В нашей стране по этой технологии возводят не более 13,5 % многоэтажных зданий.

Быстровозводимые стальные каркасы многоэтажных зданий — это перспективное направление в области проектирования. Оно предполагает применение элементов максимальной заводской готовности, соединяемых на монтаже узлами, обеспечивающими передачу расчетных усилий, при максимальной простоте конструкции узла и скорости его устройства [5–8].

Быстрособорный узел подразумевает исключение из процесса монтажа сверления отверстий, нарезки резьбы, сварки. С помощью таких узлов элементы заводской готовности соединяются друг с другом по типу конструктора с минимальными операциями по выверке пространственного положения и фиксации элементов в узле.

Развитию концепции быстрособорных узлов может способствовать идея применения контактных соединений элементов стального каркаса. Стальные конструкции стандартно соединяются либо с помощью сварных швов, либо с использованием дискретных связей (анкеров, болтов). Для сокращения операций по сборке и выверке на монтаже можно на заводе изготовить отправочные марки со всеми необходимыми соединительными деталями. Затем на строительной площадке эти конструктивные элементы объединяются в каркас установкой друг на друга без использования большого количества технологических операций и нескольких этапов контроля.

В значительной мере именно качество выполнения монтажных узлов определяет несущую способность каркаса. Монтажные узлы выполняются на строительной площадке, поэтому их конструкция должна быть максимально простой. Это позволит осуществлять монтаж конструкции рабочим обычной квалификации независимо от условий

на конкретной строительной площадке. При заводском изготовлении конструктивных элементов и быстрособорных монтажных узлов возможно возведение стальных каркасов в кратчайшие сроки и с гарантированным качеством [9–12].

Одним из путей совершенствования монтажных узлов служит проверка следующей гипотезы: фрезерованные поверхности способны обеспечить передачу не только продольных усилий, но и некоторых изгибающих моментов при использовании минимального числа фиксирующих элементов [13–18].

Недостаточная изученность функционирования стальных каркасов с быстрособорными узлами, отсутствие отработанных конструктивных решений и рекомендаций по расчету и проектированию делает актуальным исследование работы быстрозводимых каркасов [19, 20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При расчете соединений стальных конструкций традиционно применяется принцип Сен-Венана и считается, что распределение напряжений и деформаций изменяется только вблизи зоны приложения нагрузки. Возмущение должно исчезнуть на относительно небольшом расстоянии от места приложения нагрузки.

Однако, если рассматривать контактную задачу соединения конструкций, то придерживаться принципа Сен-Венана некорректно. В данном случае как раз важно исследовать непосредственную окрестность места приложения нагрузки (контакта двух тел), сравнить действующие в ней напряжения с расчетным сопротивлением и проверить выполнение условия местной устойчивости.

Контактные задачи характеризуются тем, что на части поверхности, не участвующей в контактном взаимодействии, задаются ненулевые напряжения, а в области контакта — условия на перемещения, чтобы обеспечить совместность деформаций взаимодействующих тел [21].

Увеличения скорости сборки конструкции можно достичь, применяя в стыках колонн и узлах крепления балок к колоннам передачу усилий за счет работы контактируемых поверхностей соединяемых элементов на смятие. Для того чтобы подробно изучить такие конструкции узлов, удобнее рассмотреть конкретный каркас здания.

Возьмем за основу типовой стальной каркас пятиэтажного здания максимальной заводской готовности, предложенный в публикациях [22, 23]. Каркас состоит из колонн, балок и подкосов, которые обеспечивают необходимую горизонтальную жесткость. Закрепление подкосов к нижней полке балки на треть пролета способствует уменьшению в ней изгибающего момента M_y , при этом оставляя проем для окон и дверей (рис. 1).

Перекрытие выполняется в виде монолитной плиты по профилированному настилу или с заполнением пространства между балками легкобетонными вкладышами, которые обеспечивают требуемую звукоизоляцию от воздушного шума. Возможно заполнение промежутков между плитами деревянными щитами или профнастилом, которые укладываются на нижнюю полку двутавра.

Покрытие выполняется в виде стропильной системы с опиранием на колонны каркаса. На верхнем этаже возможно устройство мансарды.

Размеры ячеек каркаса в плане установлены от 3×3 до 6×6 м. Применение комбинаций ячеек разных размеров позволяет получать сложное в плане здание. Такое разнообразие вариантов компоновки элементов несущей системы является более выгодным по сравнению с модульными аналогами, размеры ячеек которых ограничены из условий транспортировки и грузоподъемности строительной техники.

При условии задания тех же нагрузок количество этажей составляет не более 5, а размеры здания

в плане ограничены 60 м (допустимым размером температурного блока).

Высота этажа — 3,0 м. Сталь каркаса С345. Сечения элементов каркаса:

- колонны — стальной гнутый замкнутый сварной квадратный профиль 200×8 мм (ГОСТ 30245);
- подкосы — то же, 80×6 мм (ГОСТ 30245);
- балки — сварной несимметричный двутавр, верхняя полка размером 120×10 мм, нижняя — 360×14 мм, стенка — 210×6 мм.

Крепление колонн к фундаментам, монтажные стыки колонн, крепление балок к колоннам и подкосов к колоннам и балкам принято шарнирным.

Расчет каркаса выполнен в вычислительном комплексе ЛИРА-САПР на действие расчетного сочетания нагрузок, включающего собственный вес конструкций, полезную нагрузку на перекрытия, снеговую нагрузку на скатное покрытие и ветровую нагрузку (включающую как среднюю, так и пульсационную составляющую). На рис. 2 показана деформированная схема каркаса, на рис. 3 — эпюры изгибающих моментов, на рис. 4, 5 — мозаика продольных сил.

Максимальный изгибающий момент возникает в 6-метровой балке над первым этажом во втором пролете. Изгибающие моменты в колоннах и подкосах принимают очень малые значения.

Таким образом, если в расчете каркаса принять все соединения шарнирными, то балки работают как трехпролетные изгибаемые элементы. При этом колонны и подкосы работают на центральное сжатие.

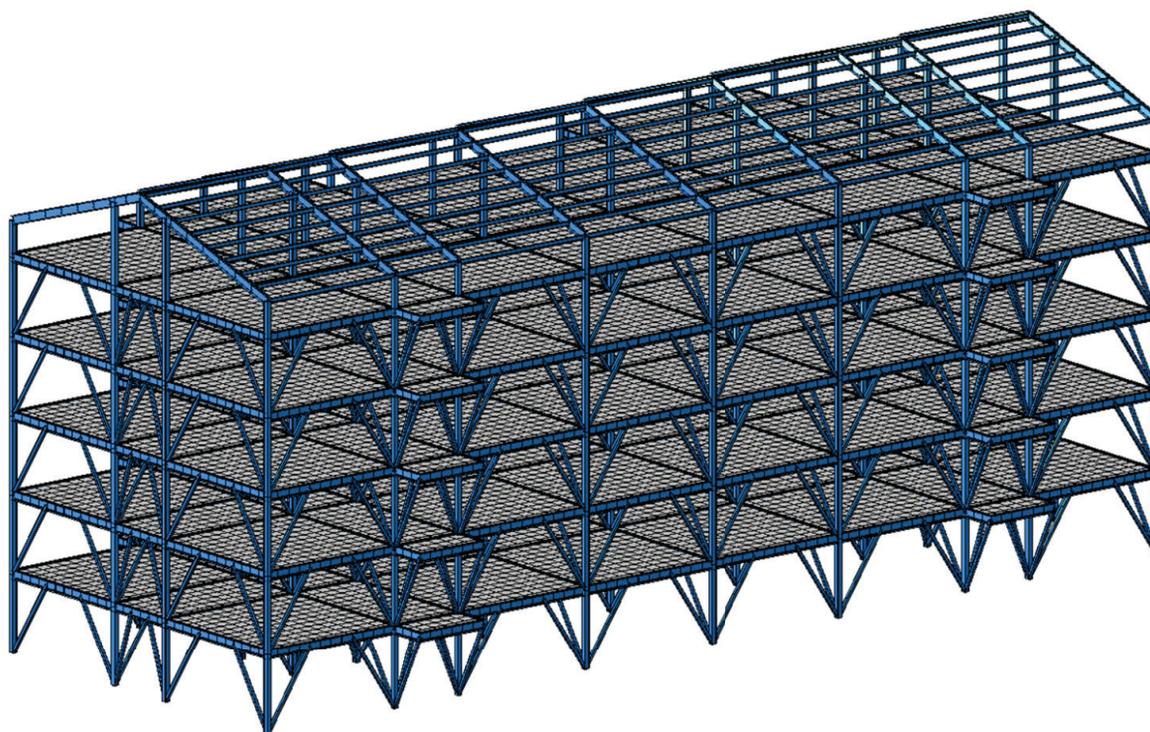


Рис. 1. Пространственная расчетная модель каркасного здания, состоящего из ячеек 6×6 , 3×6 и 6×6 м

Fig. 1. Spatial calculation model of a frame building consisting of 6×6 , 3×6 and 6×6 m cells

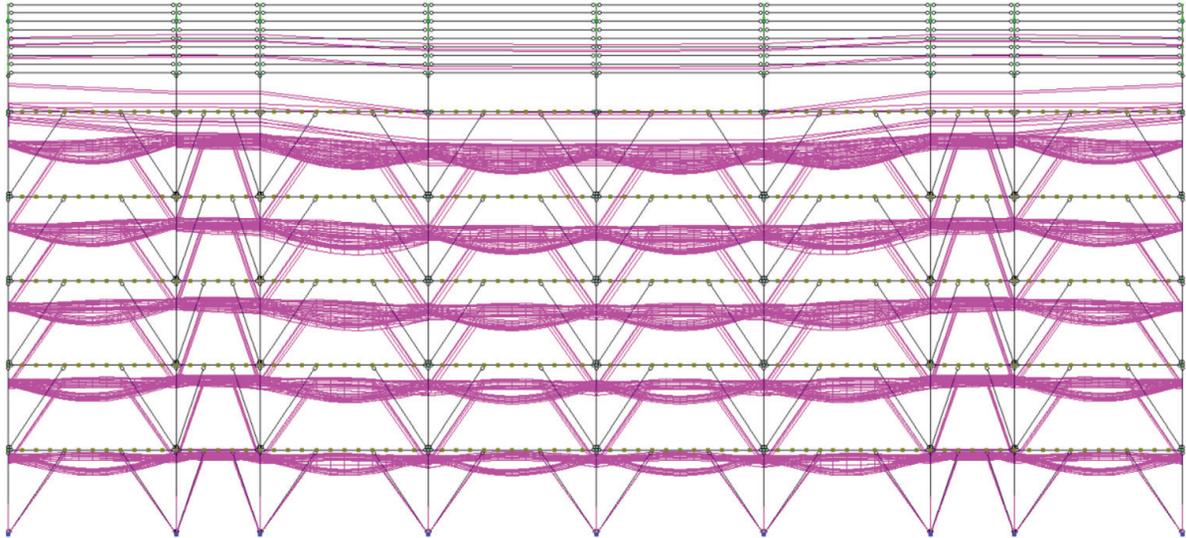


Рис. 2. Деформированный вид расчетной схемы здания
 Fig. 2. Deformed view of the design scheme of the building

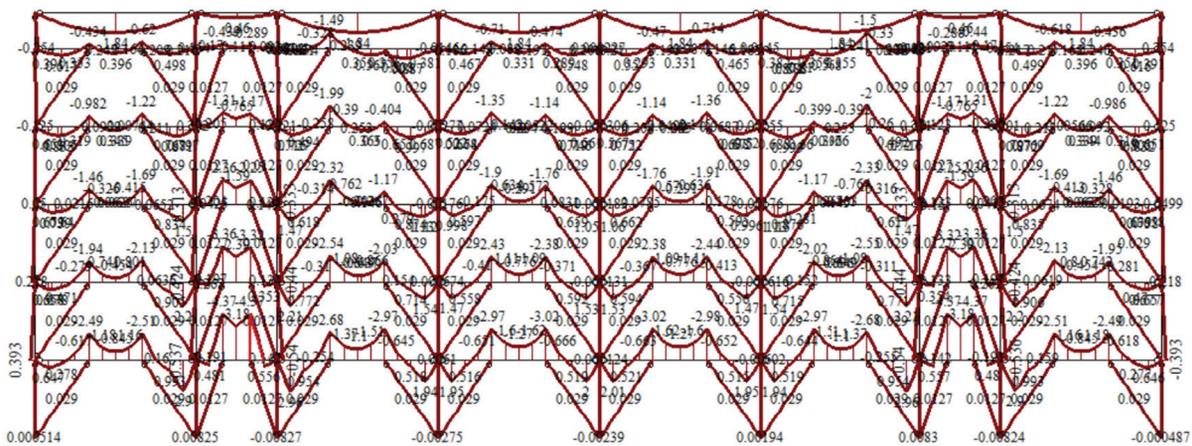


Рис. 3. Эпюра изгибающих моментов M_y , т-м, в продольной раме каркаса
 Fig. 3. Diagram of bending moments M_y , t-m, in the longitudinal skeleton frame

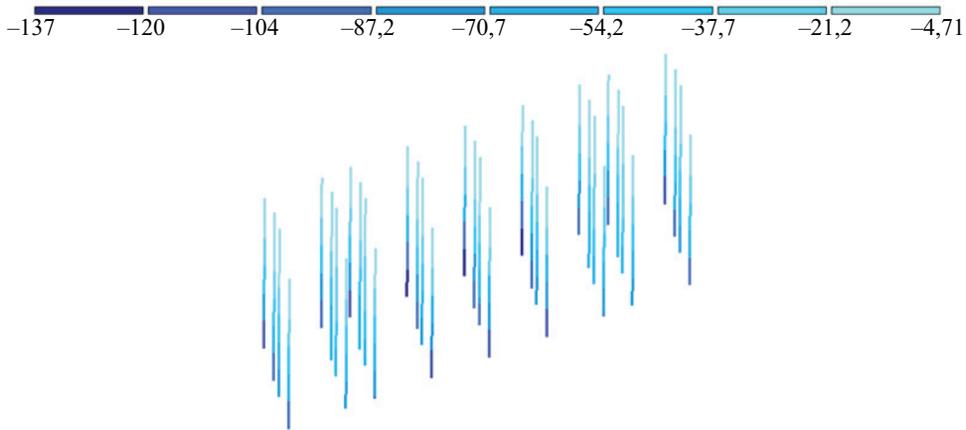


Рис. 4. Мозаика продольных сил N , т, в колоннах
 Fig. 4. Mosaic of longitudinal forces N , t, in columns

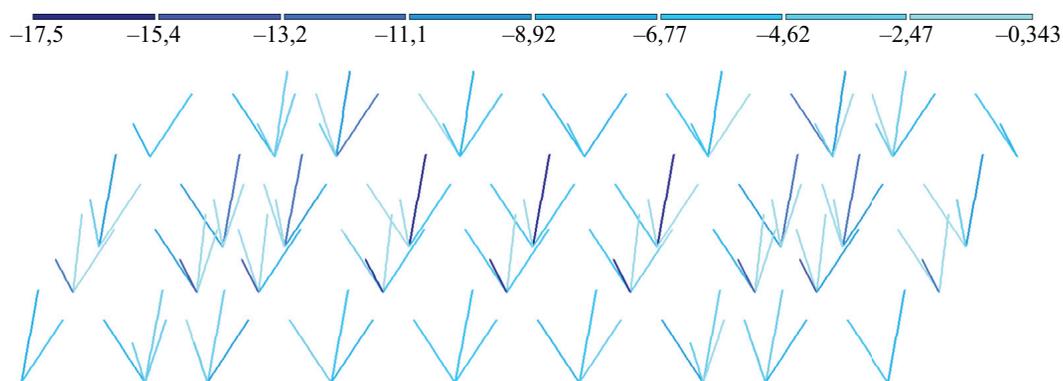


Рис. 5. Мозаика продольных сил N , t , в подкосах первого этажа

Fig. 5. Mosaic of longitudinal forces N , t , in the struts of the first floor

Выбранная компоновка стального каркаса является экономичной и простой в исполнении, способствует четкому разделению конструктивных элементов по основным видам деформаций, значительно облегчает унификацию изделий и использование простых узлов соединения элементов каркаса. Принятые сечения элементов могут применяться в жилом строительстве в небольших городах и сельской местности без проведения специальных инженерных расчетов.

Рассмотрим узел стыка колонн по высоте. Стандартным решением для такого случая служат фланцевые соединения, в которых фланцы привариваются к торцам колонн, строгаются для исключения влияния сварочных деформаций на геометрию узла. Соединение элементов колонны осуществляется болтами. Кроме фланцевых узлов возможны узлы с боковыми накладками, которые привариваются к колоннам при монтаже каркаса. Фланцевый узел имеет более развитые размеры по сравнению с сечением колонны, что влияет на интерьер помещения, требует дополнительной отделки из-за выступающих элементов узла. Узел на накладках требует проведения сварочных работ на строительной площадке.

Монтажный стык колонн можно выполнить, используя непосредственный контакт двух фрезерованных поверхностей, перпендикулярных оси профиля. Рассмотрим два варианта таких соединений (рис. 6, 7).

Первый вариант стыка колонн осуществляется с помощью четырех монтажных направляющих пластин толщиной 5 мм, приваренных к внутренним граням нижней колонны квадратного сечения. Пластины имеют в верхней половине отгиб во внутреннюю часть колонны на 1–2 мм для упрощения монтажа верхней колонны.

Второй вариант стыка колонн выполнен с помощью вспомогательного сварного элемента, представляющего собой крестовину из трех листов из стали толщиной 10 мм. Указанная деталь помещается в прямоугольные вырезы в стенках труб со стороны

торцов. Для удобства монтажа крестовина приваривается угловыми швами к нижней колонне. Верхняя колонна устанавливается сверху и фиксируется болтами М12 через сделанные в стенках труб отверстия с резьбой и упирается в стенки крестовины, исключая смещение верхней колонны. При небольших изгибающих моментах фиксирующие болты не рассчитываются и ставятся конструктивно. Для облегчения монтажа прямоугольные вырезы в верхней колонне выполняются на 1–2 мм больше толщины пластин, образующих крестовину [24].

В обоих случаях продольное усилие N передается с верхней колонны на нижнюю через непосредственный контакт отфрезерованных торцевых поверхностей труб за счет работы на смятие торцов стенок нижней и верхней частей колонны. При таком взаимодействии возможен местный изгиб стенок колонны, что может привести к уменьшению площади контакта и более неравномерному распределению по поверхности контакта нормальных напряжений. Контактные узлы сохраняют работоспособность и при действии изгибающих моментов до того момента, пока не начнет происходить отрыв одной контактирующей поверхности от другой. В противном случае необходимо либо снижение эксплуатационной нагрузки, либо доработка узлов и конструирование расчетных болтовых соединений.

Конструкция узлов не предполагает необходимость выверки положения верхней части колонны относительно нижней. Соосность колонн обеспечивается наличием направляющих элементов и фрезерованных поверхностей, перпендикулярных продольным осям нижней и верхней колонн. Из-за наличия зазоров между боковыми пластинами или краями вырезов и монтажной крестовиной возможно смещение верхней колонны относительно нижней. С учетом возможного смещения верхней колонны относительно нижней площадь контакта будет меньше площади сечения колонны. Это ведет к несимметричному загрузению колонны, появлению местных изгибающих моментов, усложняющих передачу усилий в узле через контакт

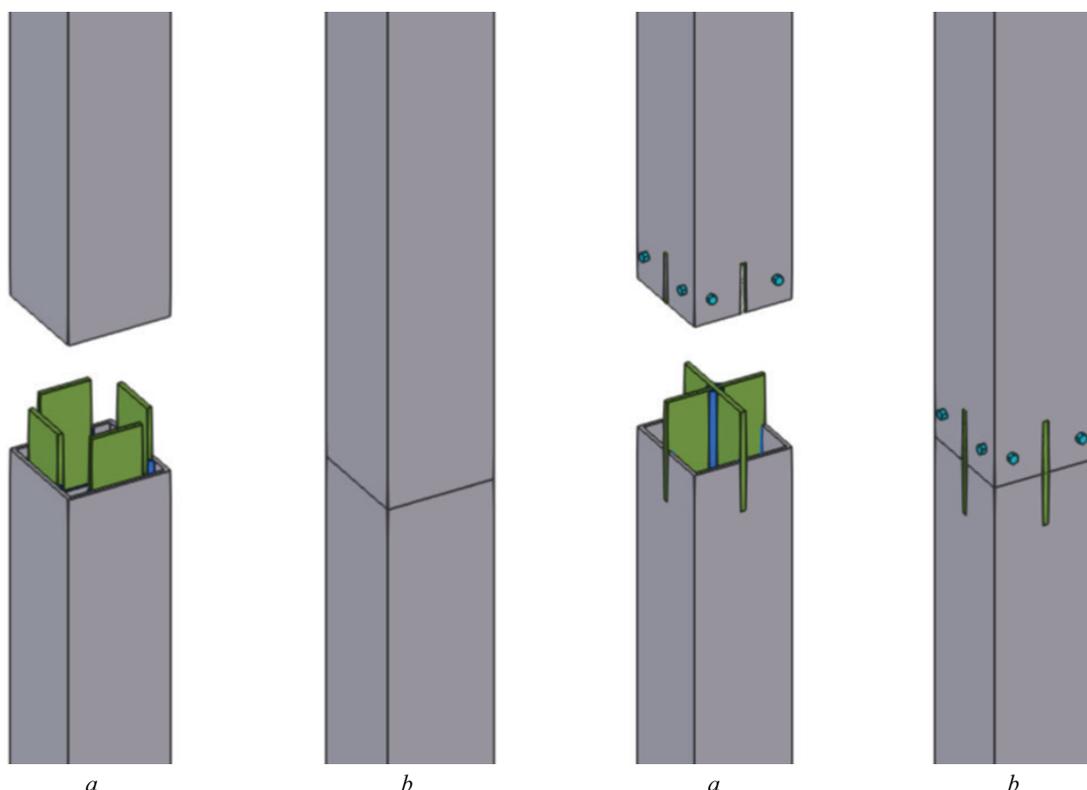


Рис. 6. Контактный стык колонн из квадратных труб с направляющими пластинами: *a* — в разобранном виде; *b* — в собранном виде

Fig. 6. The contact joint of columns made of square pipes with guide plates: *a* — disassembled; *b* — assembled

Рис. 7. Контактный стык колонн сечением из квадратных труб с направляющей сварной крестовиной: *a* — в разобранном виде; *b* — в собранном виде

Fig. 7. The contact joint of columns with cross section of square pipes with guide welded crosspiece: *a* — disassembled; *b* — assembled

тирующие поверхности. Так, для квадратной трубы сечением 200×8 мм при смещении всего на 1 мм по осям *X* и *Y* площадь контакта в узле уменьшается от $54,1 \text{ см}^2$ (рис. 8, зеленая область) при идеальном полном контакте двух торцевых поверхностей труб до $33,7 \text{ см}^2$ (рис. 8, красная область). Таким образом, при относительно небольшом смещении профилей площадь контакта уменьшается на 38 %, что за-

метно влияет на уровень контактных напряжений в узле [25].

Рассмотрим узел шарнирного примыкания балки к колонне. Данное соединение обычно выполняется с применением болтов, привариваемых пластин, опорных столиков. Как правило, для выполнения такого соединения необходимо прибегать к использованию монтажной сварки, сверлению отверстий

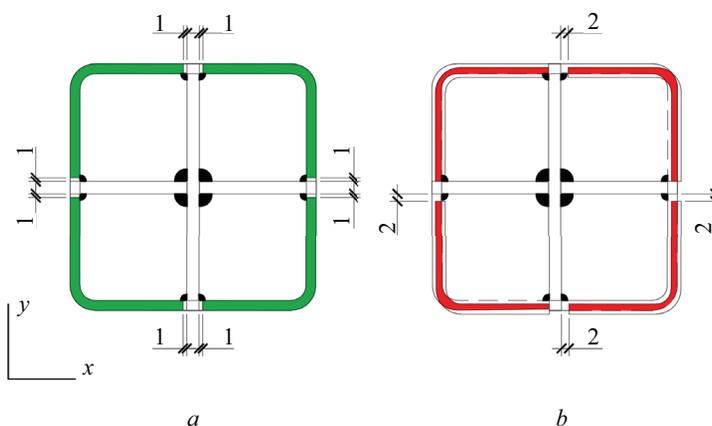


Рис. 8. Площади контакта нижней и верхней колонн: *a* — при идеально ровной установке; *b* — при перекосе

Fig. 8. The contact areas of the lower and upper columns: *a* — in case of perfectly level installation; *b* — in case of misalignment

в элементах по месту. В шарнирных узлах крепления балок к колоннам также можно использовать контактную передачу усилий в узле.

В деревянных конструкциях и машиностроении используется разъемное соединение по системе «ласточкин хвост»: на охватывающей детали выполняется один или несколько пазов трапецевидной формы, а на охватываемой — шипы соответствующей формы и количества. Важная особенность такого соединения заключается в том, что узел формируется в пределах габаритов соединяемых элементов, без выступающих частей. В стальных каркасах подобное конструктивное решение позволяет сформировать монтажный узел балки с колонной, обеспечивающий быстрый монтаж балок и не требующий выверки положения балки после монтажа конструкции.

В заводских условиях к колонне приваривается пластина толщиной 20–30 мм с вырезом под шип балки. К этой пластине приваривается пластина толщиной 6–10 мм с вырезом под стенку балки для формирования паза, в который будет установлена опорная часть балки. Для передачи нагрузки на торец балки приваривается опорное ребро толщиной 8–12 мм, которое является шипом. При монтаже балка устанавливается шипами в пазы на колоннах. Монтажные зазоры могут регулироваться винтами юстировки и пластинами, устанавливаемыми в зазоры соединения после монтажа балки с помощью гидравлических домкратов. Разработанный узел обладает определенной жесткостью на изгиб, что требует исследования влияния параметров узлового соединения на изгибную жесткость узла и влияния этой жесткости на работу балки, колонны и каркаса в целом. На рис. 9 показан узел типа ласточкин хвост.

Кроме полужесткого узла разработана конструкция быстро собираемого шарнирного соеди-

нения балки с колонной с использованием отрезка круглой трубы сечением 30×8 мм (ГОСТ 8734–75, класс стали С345), который приваривается в нижней части торцевой пластины балки. В этом случае к колонне приваривается «карман» в виде гнутой пластины толщиной 10 мм с опорным ребром и боковыми пластинами, формирующими паз. При монтаже балка с опорным ребром с отрезком круглой трубы устанавливается в карман (рис. 10). При этом криволинейные поверхности трубы и гнутой пластины находятся в контакте, а балка за счет сформированной чаши «кармана» закреплена от линейных перемещений. Поворот балки в опорном сечении возможен за счет перекачивания участка трубы по внутренней криволинейной поверхности гнутой пластины, формирующей «карман». К недостаткам этой конструкции следует отнести большой эксцентриситет приложения опорной реакции относительно наружной грани колонны, что усложняет условия крепления опорных элементов узла к колонне.

Для оценки работоспособности проведен расчет узла, показанного на рис. 6. Расчет выполнялся с учетом геометрической и физической нелинейности с использованием ПК Simcenter FEMAP with NASTRAN (версия 2022.2). Принятые единицы измерения: мм, Н, Н/мм². Моделирование производилось с учетом закругленных углов профиля. Расчет выполнен для колонны из квадратной трубы 200×8 мм. Используемый тип конечных элементов (КЭ) — Solid (объемные). Основная разбивка осуществляется на гексагональные 3D-элементы, в местах закруглений применяются элементы в форме треугольных призм. Характерный размер элемента — 10 мм по длине и ширине профиля и один слой элементов по толщине стенки. Тип расчета — нелинейный мультишаговый (27..Multi-Step Structural).

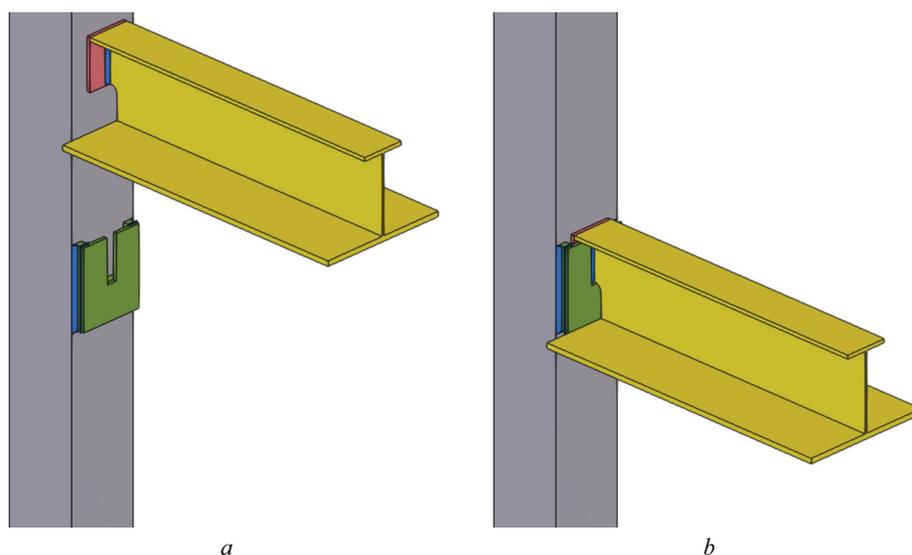


Рис. 9. Соединение стальной колонны и балки по системе «ласточкин хвост»: *a* — в разобранном виде; *b* — в собранном виде

Fig. 9. Dovetail connection of a steel column and beam: *a* — disassembled; *b* — assembled

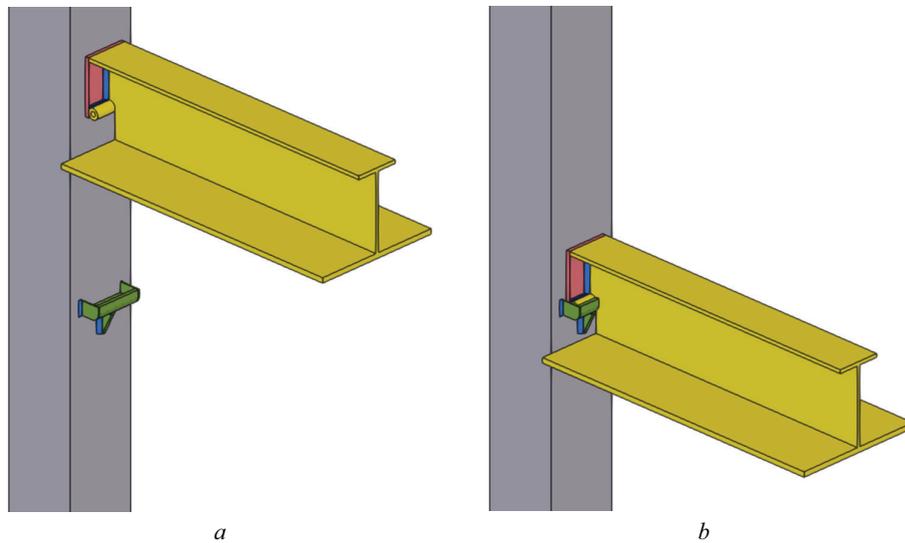


Рис. 10. Соединение стальной колонны и балки с помощью отрезка круглой трубы и гнутой пластины, формирующей «карман»: *a* — в разобранном виде; *b* — в собранном виде

Fig. 10. Connection of a steel column and beam using a piece of round pipe and a bent plate, forming a “pocket”: *a* — disassembled; *b* — assembled

Торцы труб в исследуемом узле идеально ровные, без перекосов и сдвигов. Кроме основного профиля в расчетную модель включены пластины толщиной 5 мм, исключая смещение частей колонны друг относительно друга. Пластины моделируются ровными и параллельными внутренним граням труб, без загибов внутрь трубы.

Общий вид модели приведен на рис. 11.

Для удобства задания нагрузки для узлов свободного торца верхней колонны создан жесткий элемент RBE2. Нагрузка прикладывается в центральный (независимый) узел и передается на связанные

(зависимые) узлы, принадлежащие телу колонны. Рассмотрен частный расчетный случай центрального сжатия колонн.

Узлы, расположенные на нижнем торце нижней трубы, закреплены по всем направлениям (TX , TU , TZ , RX , RY , RZ).

Для исключения влияния местных напряжений в зоне приложения нагрузки и в зоне закрепленных узлов длина верхней и нижней трубы принята по 1000 мм.

Материал конструктивных элементов, используемый в расчете: сталь С345К (материал изотроп-

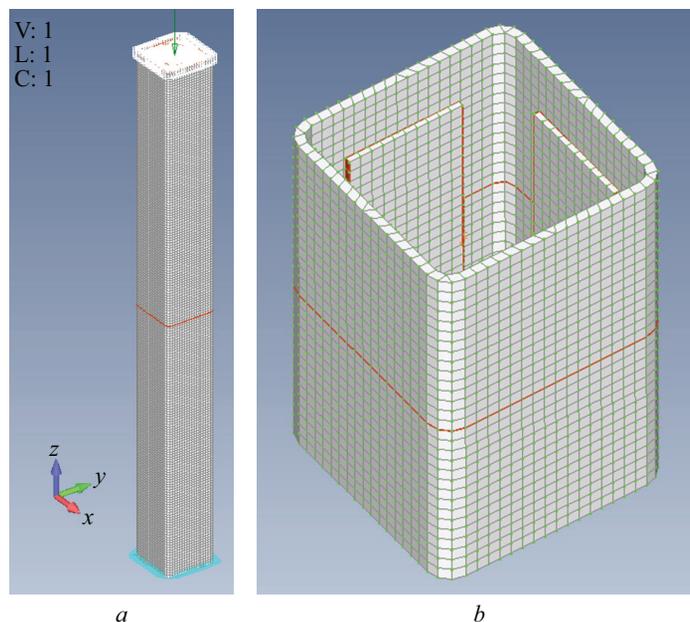


Рис. 11. Конечно-элементная модель узла стыка колонн с использованием пластин: *a* — общий вид; *b* — узел стыка крупным планом

Fig. 11. Finite element model of the column junction joint using plates: *a* — general view; *b* — close-up of the junction

ный). Расчетное сопротивление стали по пределу текучести $R_y = 350$ МПа, расчетное сопротивление стали по временному сопротивлению $R_u = 460$ МПа, расчетное сопротивление на смятие $R_p = 460$ МПа. В расчетах учитывается нелинейность свойств материала. Диаграмма работы стали назначена с учетом рекомендаций СП 16.13330.2017 по Приложению В.

Для моделирования контактов между КЭ по поверхностям соприкосновения заданы:

1) Connection Property — Contact (для моделирования контакта и трения) и Glued (для моделирования сварки);

2) Connection Regions — поверхности, между которыми происходит контакт;

3) Connectors — контактные пары.

Всего создано 38 контактных регионов (Connection Regions) и 25 контактных пар (Connectors).

Коэффициент трения для стальных поверхностей принят равным 0,25.

Нагрузка приложена строго вдоль оси верхней колонны. Значение продольной силы N подобрано из условия прочности элементов сплошного сечения по формуле (5) СП 16.13330.2017:

$$N = A_n R_y \gamma_c = 2073,4 \text{ кН}, \quad (1)$$

где $A_n = 59,24 \text{ см}^2$ — площадь сечения нетто; $R_y = 350$ МПа; $\gamma_c = 1,0$ — коэффициент условия работы.

Наибольшее продольное усилие в колоннах при расчете каркаса пятиэтажного здания с мансардой составило 1344,0 кН, что меньше нагрузки, вычисленной по формуле (1), на 35,2 % из-за учета при расчете несущей способности колонны не только прочности, но и устойчивости.

При расчете контактных монтажных узлов, где использован минимум фиксирующих элементов и фиксация в горизонтальной плоскости осуществляется прежде всего за счет трения, необходима оценка несущей способности узла на действие фиктивной поперечной силы. Для рассмотренного выше здания фиктивная поперечная сила определяется по формуле (18) СП 16.13330.2017:

$$Q_{fic} = 7,15 \cdot 10^{-6} \left(2330 - \frac{E}{R_y} \right) N / \varphi = 18,2 \text{ кН}, \quad (2)$$

где $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа — модуль упругости стали; $R_y = 350$ МПа — расчетное сопротивление стали; $N = 1344,0$ кН — продольное усилие в колонне; φ — коэффициент устойчивости при центральном сжатии.

Расчетная длина колонны $l_{ef} = 3$ м принята равной высоте этажа. Для сечения в виде квадратной трубы 200×8 мм гибкость $\lambda = 300/7,76 = 39$, условная гибкость $\bar{\lambda} = 1,59$. Коэффициент устойчивости для колонны при такой гибкости равен 0,92.

При коэффициенте трения 0,25 воспринимаемая контактными поверхностями сила за счет трения при продольном усилии 1344,0 кН составляет

336 кН. Таким образом, до исчерпания несущей способности квадратной трубы за счет сил трения обеспечена фиксация частей колонн в горизонтальной плоскости. Однако наличие поперечной силы означает действие в колонне изгибающего момента. Этот момент может возникнуть при потере устойчивости колонны, и его появление следует учитывать при расчете монтажных узлов для оценки особенностей их работы. Величина изгибающего момента при постоянной по длине колонны фиктивной поперечной силе составит в узлах не более:

$$M_{fic} = 18,2 \cdot 3/2 = 27,30 \text{ кН} \cdot \text{м}. \quad (3)$$

Это соответствует приложению продольной силы с эксцентриситетом:

$$e = 2730 / 1344 = 2,03 \text{ см}. \quad (4)$$

Радиус ядра сечения для трубы 200×8 мм равен 6,01 см. Так как эксцентриситет меньше радиуса ядра сечения, то при появлении изгибающего момента из-за потери устойчивости вся контактная зона должна работать на сжатие. Максимальные по абсолютной величине сжимающие нормальные напряжения в узле каркаса здания от совместного действия продольной сжимающей силы 1344 кН и изгибающего момента 27,3 кН·м составляют:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A_n} + \frac{M_{fic}}{W_n} = 303 \text{ МПа}, \quad (5)$$

а минимальные по абсолютной величине нормальные напряжения:

$$\sigma_{\min} = \frac{N}{A_n} - \frac{M_{fic}}{W_n} = 150 \text{ МПа}, \quad (6)$$

где $W_n = 356,5 \text{ см}^3$. Максимальные нормальные напряжения не превышают расчетного сопротивления стали по пределу текучести R_y , поэтому прочность узла обеспечена с коэффициентом использования сечения 0,87.

С учетом возможного появления изгибающего момента расчет узла выполнен на действие двух загрузений:

- 1-е заграждение: на узел действует только продольная сила 2073,4 кН;

- 2-е заграждение: на узел действует продольная сила 1344,0 кН и изгибающий момент 27,3 кН·м.

При проведении расчета с учетом геометрической и физической нелинейности нагрузка прикладывалась поэтапно. Используется 25 равных ступеней приложения нагрузки (инкрементов), которые характеризуют линейную функцию нагружения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка прочности производится по эквивалентным напряжениям, вычисленным по критерию Мизеса (Solid Von Mises Stress). Результаты расчета для 1-го заграждения приведены на рис. 12.

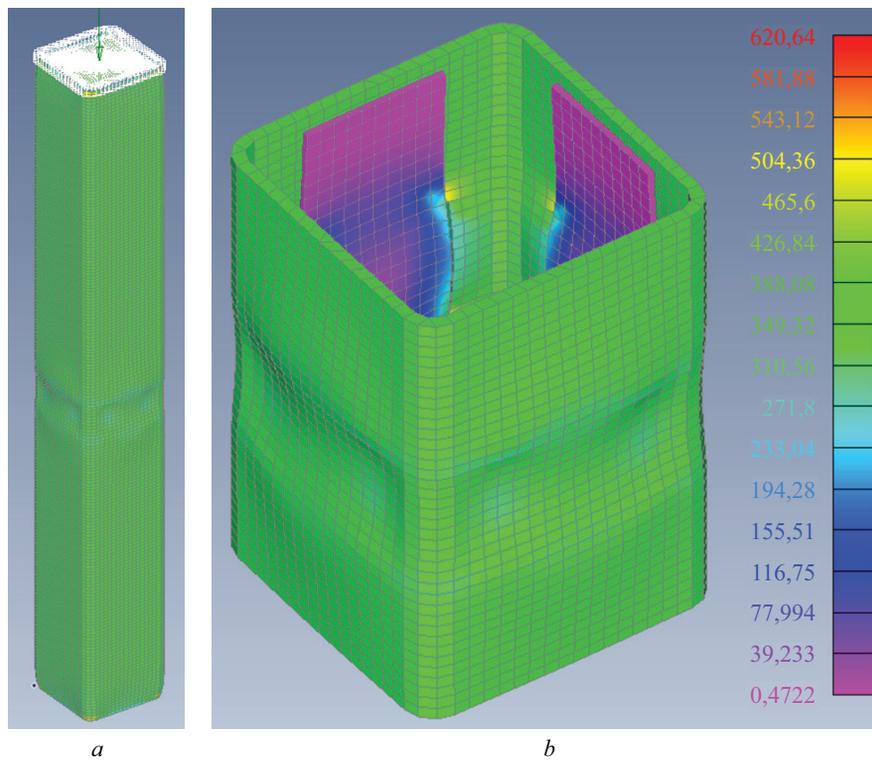


Рис. 12. Деформированный вид модели с изополями эквивалентных напряжений (1-е нагружение): *a* — общий вид; *b* — узел стыка крупным планом

Fig. 12. Deformed view of the model with isofields of equivalent stresses (1st load): *a* — general view; *b* — close-up of the junction

Несмотря на приложение нагрузки по величине, соответствующей участку диаграммы работы стали до достижения предела текучести, видны локальные зоны с напряжениями выше данного значения (см. шкалу на рис. 12, *b*).

Форма труб по контакту изменяется и стремится превратиться из квадратной в круглую (рис. 13).

Более деформативным оказывается торец нижней колонны: наблюдается выпучивание стенок как внутрь, так и наружу трубы.

Как видно на изополях напряжений, существенное влияние оказывают приваренные к внутренним граням трубы пластины. Участки с напряжениями, близкими к 488,8 МПа, располагаются там, где заканчиваются пластины и сварные швы. В этих зонах пластины своими нижними углами оказывают точечное влияние на грани трубы (рис. 14). За счет изгиба граней трубы одни волокна разгружаются, а другие догружаются за счет контактных деформаций. Это видно по изополям напряжений, которые

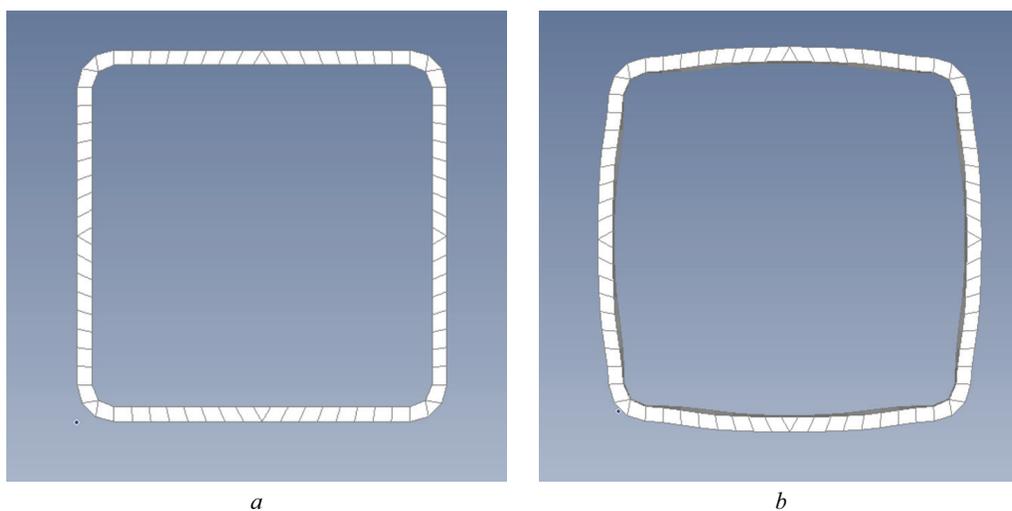


Рис. 13. Форма колонны: *a* — до деформации; *b* — после деформации (1-е нагружение)

Fig. 13. Column shape: *a* — before deformation; *b* — after deformation (1st load)

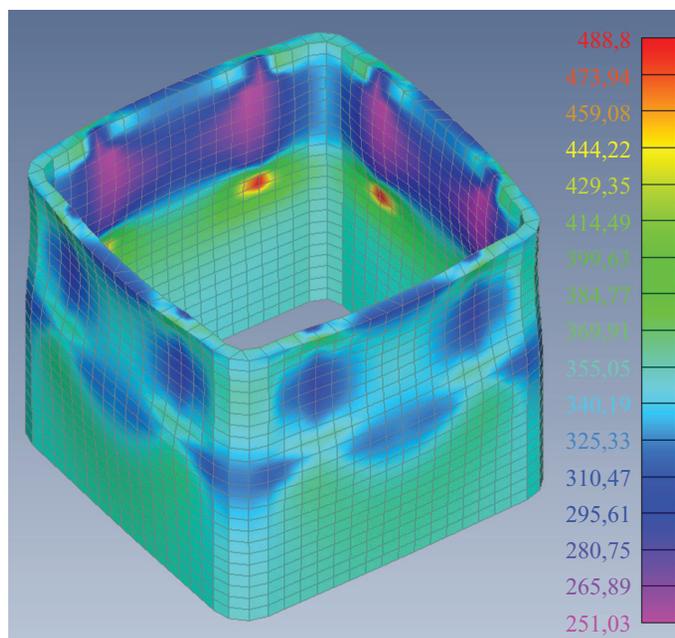


Рис. 14. Деформированный вид верхней части нижней колонны с изополями эквивалентных напряжений (1-е нагружение)

Fig. 14. Deformed view of the upper part of the lower column with isofields of equivalent stresses (1st load)

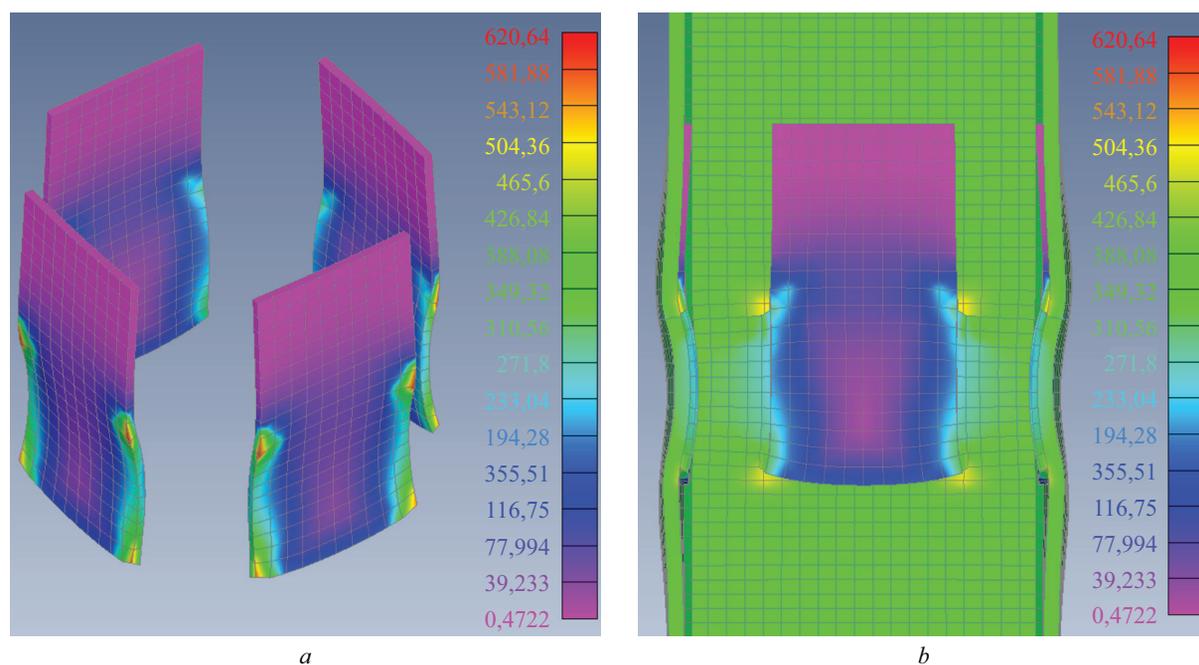


Рис. 15. Деформированный вид пластин с изополями эквивалентных напряжений (a) и разрез по узлу (b) для 1-го нагружения

Fig. 15. Deformed appearance of plates with isofields of equivalent stresses (a) and a section along the joint (b) for 1st load

расположены на внутренней и наружной гранях одних и тех же КЭ.

Пластины деформируются аналогично стенкам нижней колонны. Наибольшие напряжения составляют около 620,6 МПа и находятся на очень малых участках: в зонах контакта с торцевой частью верхней трубы, а также там, где пластины нижними

углами контактируют с деформируемыми стенками нижней трубы (рис. 15).

Заметим, что верхние части пластин фактически почти не включаются в работу, в них напряжения практически равны нулю. Контакт с верхней колонной за счет деформации нижнего торцевого участка происходит не по всей поверхности соеди-

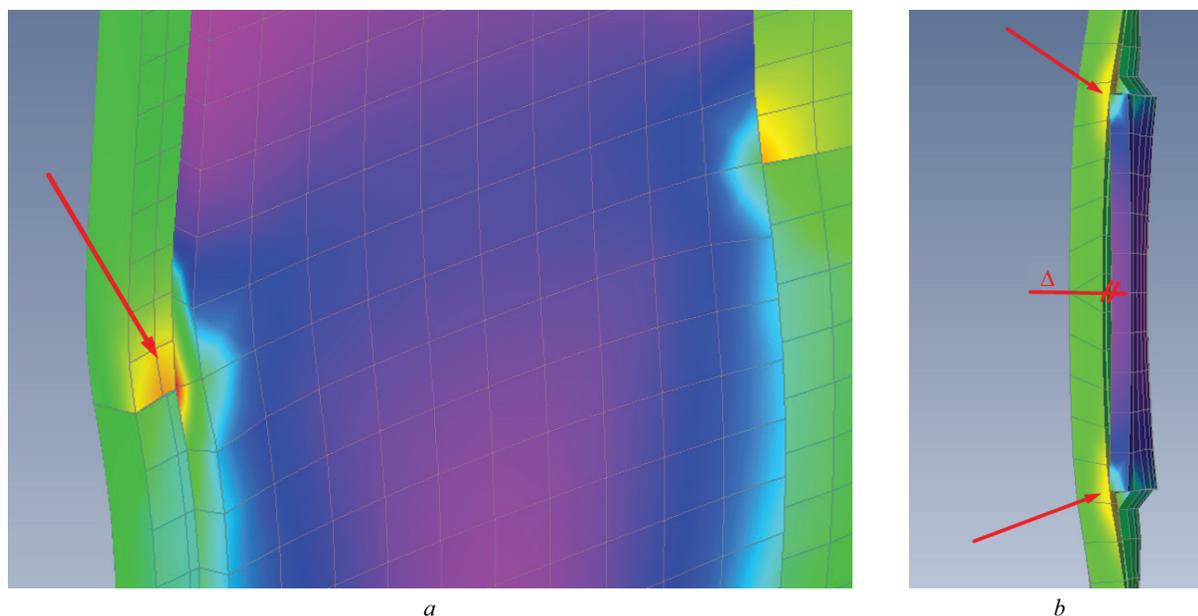


Рис. 16. Увеличенный вид контакта пластины и стенки трубы (а) и вид сверху (b) для 1-го нагружения
 Fig. 16. Enlarged view of the contact between the plate and the pipe wall (a) and the top view (b) for 1st load

нения, как предполагалось, а по малому участку ребра пластины, фактически в точке касания ребра торцевой грани верхней трубы и ребра пластины. Именно этим и обусловлен местный рост эквивалентных напряжений в пластинах и верхней трубе.

На рис. 16 приведены увеличенные виды, демонстрирующие контакт граней верхней трубы и пластин не по поверхности, а по участку ребра. В средней части виден зазор Δ .

Стенки у торца верхней трубы также выпучиваются, но только наружу (в отличие от нижней колонны). Напряжения в некоторых зонах достигают значения 506,9 МПа, что обусловлено локальным контактом деформируемых стенок трубы с пластинами (рис. 17).

Также как и для нижней части колонны в зоне контакта у верхней части колонны фиксируются небольшие участки с эквивалентными напряжениями, достигающими временного сопротивления стали $R_u = 460$ МПа. Однако наличие таких зон не свидетельствует об исчерпании прочности соединения ввиду незначительности размеров этих зон.

Минимальное значение нормальных контактных напряжений по торцам труб — 335,5 МПа. Максимальное значение нормальных контактных напряжений по торцам труб — 388,2 МПа. Контактные напряжения по торцам труб не превышают расчетное сопротивление стали С345К смятию $R_p = 460$ МПа. Изополе нормальных контактных напряжений на торце трубы показано на рис. 18.

Результаты расчета для 2-го нагружения приведены на рис. 19. При наличии эксцентриситета качественно изменяется деформированный вид модели. Две трубы изгибаются вместе почти как одно целое за счет наличия трения между фрезерованными торцами.

Стенки труб в менее сжатой части узла изгибаются, но не выпучиваются. Стенки труб в более сжатой части узла выпучиваются, но незначительно. Отрыва одного торца колонны от другого не происходит.

Фиксирующие пластины практически не деформируются, лишь пластина в менее сжатой части узла отгибается вслед за верхней трубой (рис. 20).

На рис. 21 показано изополе нормальных контактных напряжений на торце трубы. Максимальные нормальные контактные напряжения по торцам труб достигают 365,4 МПа. Минимальные нормальные контактные напряжения по торцам труб составляют 119,7 МПа. Контактные напряжения по торцам труб не превышают расчетное сопротивление стали

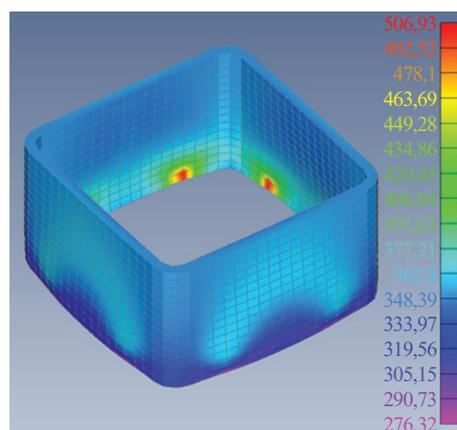


Рис. 17. Деформированный вид нижней части верхней колонны с изополями эквивалентных напряжений (1-е нагружение)

Fig. 17. Deformed view of the lower part of the upper column with isofields of equivalent stresses (1st load)

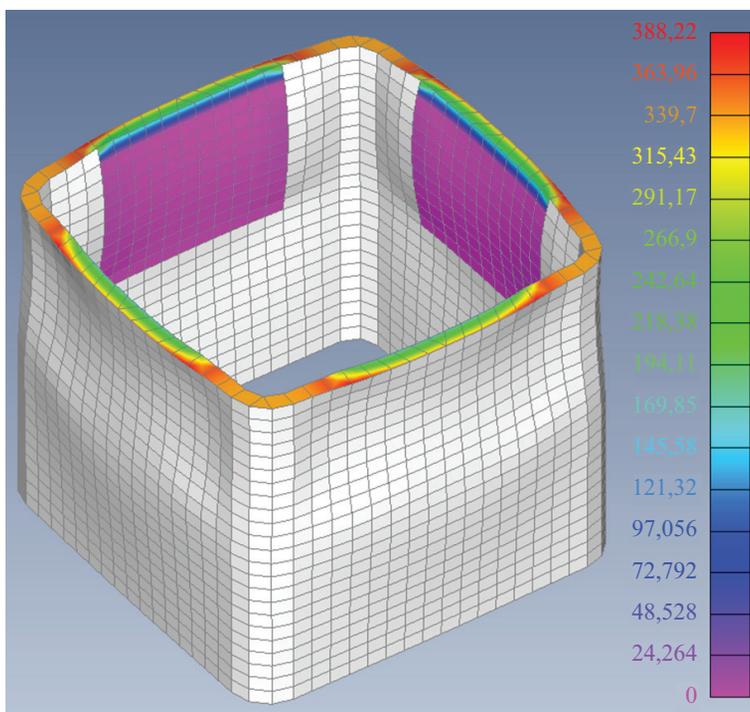


Рис. 18. Изополе нормальных контактных напряжений на торце трубы (1-е загрузеение)

Fig. 18. Isofield of normal contact stresses at the end of the pipe (1st load)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 6, 2024
 Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 6, 2024

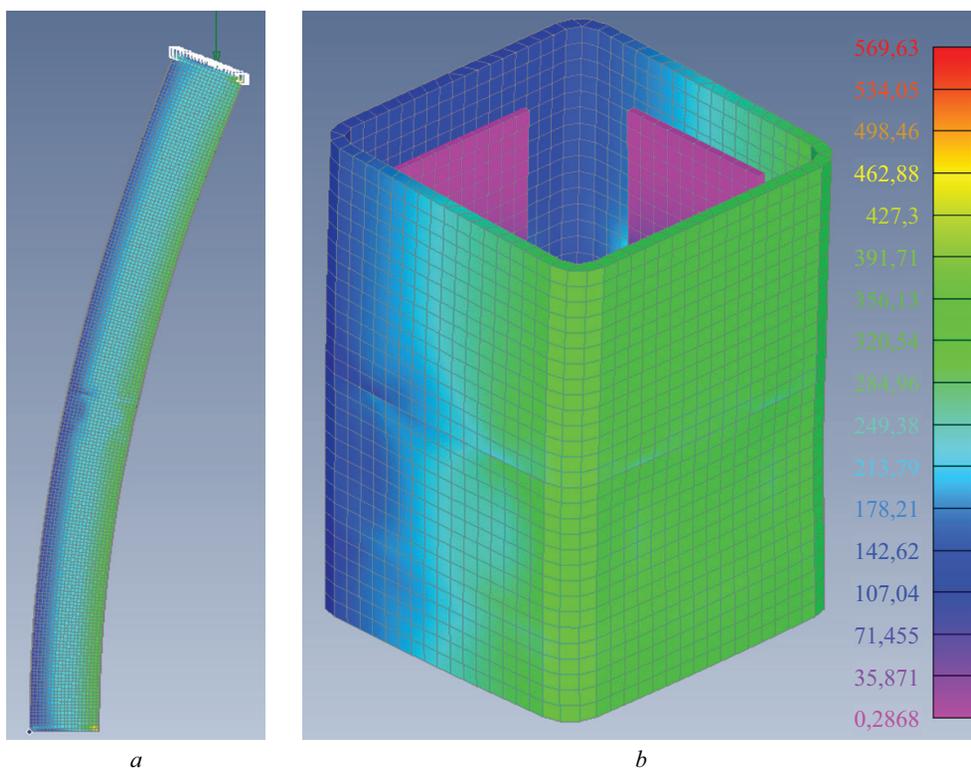


Рис. 19. Деформированный вид модели с изополями эквивалентных напряжений (2-е загрузеение): *a* — общий вид; *b* — узел стыка крупным планом

Fig. 19. Deformed view of the model with isofields of equivalent stresses (2nd load): *a* — general view; *b* — close-up of the junction

С345К смятию $R_p = 460$ МПа, что позволяет сделать вывод об обеспечении прочности узла.

Сравнение максимальных нормальных контактных напряжений с расчетным сопротивлением

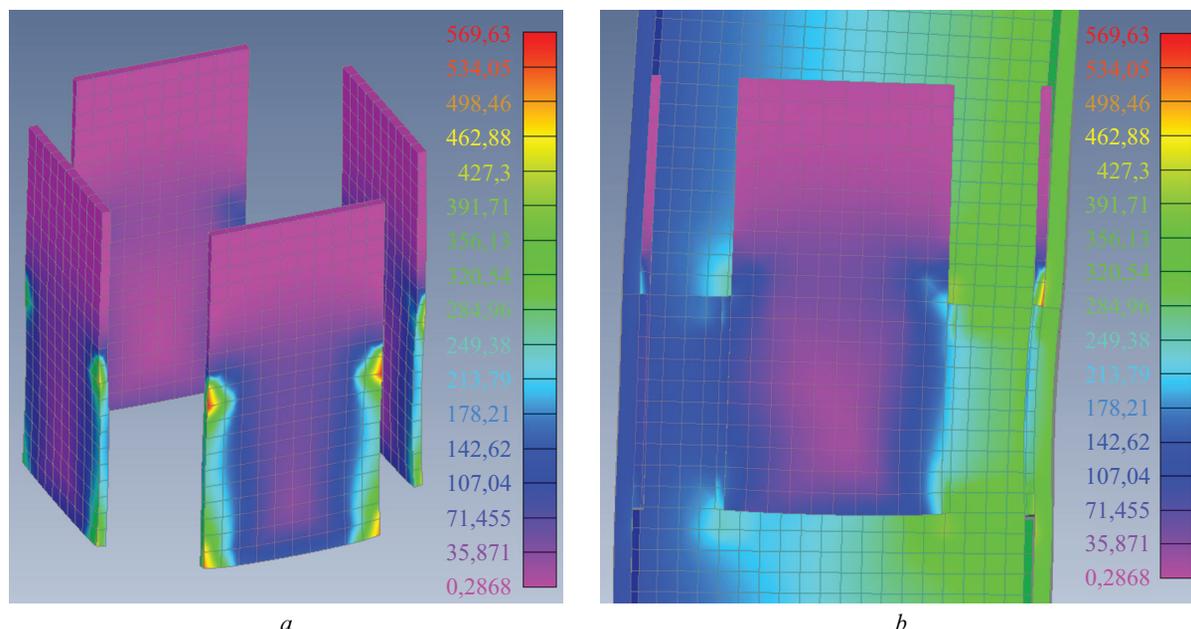


Рис. 20. Деформированный вид пластин с изополями эквивалентных напряжений (а) и разрез по узлу (b) для 2-го нагружения

Fig. 20. Deformed appearance of plates with isofields of equivalent stresses (a) and a section along the joint (b) for 2nd load

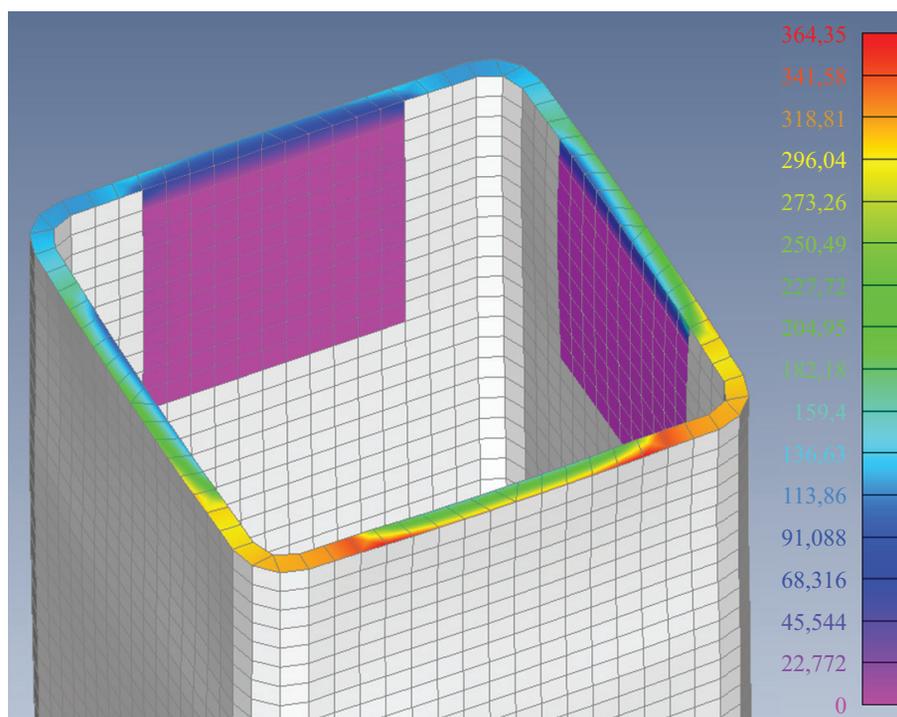


Рис. 21. Изополе нормальных контактных напряжений на торце трубы (2-е нагружение)

Fig. 21. Isofield of normal contact stresses at the end of the pipe (2nd load)

на снятие R_p показало, что коэффициент использования прочности сечения составляет 0,79, что меньше, чем коэффициент использования, вычисленный выше в линейной постановке с использованием в качестве допустимых максимально возможных нормальных напряжений. Таким образом, в качестве критерия исчерпания прочности контактного стыка при внецентренном действии продольной

силы можно, как и для случая центрального сжатия, рекомендовать применение расчетного сопротивления по пределу текучести R_y .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Каркас многоэтажного здания из прокатных двутавров и гнутосварных элементов обладает ря-

дом преимуществ:

- доступность прокатных двутавров и гнutosварных профилей;
- монтаж каркаса из элементов максимальной заводской готовности;
- более высокая коррозионная стойкость по сравнению с легкими стальными тонкостенными конструкциями (ЛСТК);
- малая трудоемкость монтажа;
- расход металла (38–44 кг/м²), сопоставимый с расходом металла при использовании ЛСТК (30–41 кг/м²);
- стоимость конструкций каркаса из прокатных двутавров и гнutosварных профилей с учетом монтажа 2780–3200 руб/м², что меньше стоимости ЛСТК (не менее 4500 руб/м²);
- минимальные транспортные издержки;
- малые габаритные размеры и масса элементов каркаса дают возможность выполнять монтаж с использованием кранов небольшой грузоподъемности.

Предложенная идея использования контактных соединений в быстровозводимых стальных каркасах многоэтажных зданий является перспективной и актуальной. Применение быстросборных узлов позволит возводить несущий остов сооружения за более короткий срок, что отразится на стоимости строительно-монтажных работ в целом. Однако в нашей стране отсутствуют рекомендации по применению и расчету подобных соединений. Поэтому сложной и интересной задачей ставится всестороннее исследование поведения контактных соединений, определение допустимых значений нагрузок, изучение влияния дефектов изготовления и обработки на качество передачи усилий от одного элемента к другому. Для решения этой задачи важным является проведение лабораторных испытаний и численных исследований с использованием современных вычислительных комплексов.

Численный расчет контактного монтажного узла подтвердил работоспособность таких узлов и возможность применения в каркасах многоэтажных зданий.

По результатам численного расчета одного из предложенных узлов для случая центрального сжатия можно сделать следующие выводы:

- определена работоспособность монтажных узлов с передачей продольных сжимающих усилий за счет контактного взаимодействия фрезерованных

торцов установленных друг на друга колонн из квадратных труб при использовании минимального числа фиксирующих элементов;

- установлено, что даже при действии продольного усилия без эксцентриситета из-за местного искривления стенок профилей напряжения в зоне контакта распределены неравномерно, максимальные эквивалентные напряжения превосходят минимальные напряжения на 13,6 %;

• для колонн из труб при центральном и внецентренном действии продольного сжимающего усилия в качестве критерия несущей способности контактного монтажного узла следует использовать расчетное сопротивление по пределу текучести, при реализации такого подхода максимальные напряжения в зоне контакта не достигают расчетного сопротивления на смятие, но могут превышать предел текучести;

• контактный узел сохраняет работоспособность не только при центральном сжатии, но при действии продольных усилий с эксцентриситетами, не превышающими радиус ядра сечения, в этом случае предельную продольную силу следует определять по достижению максимальных нормальных сжимающих напряжений расчетному сопротивлению по пределу текучести, при таком подходе максимальные эквивалентные напряжения не превышают расчетного сопротивления на смятие;

• при коэффициенте трения 0,25 за счет сил трения в контактных монтажных узлах возможно восприятие фиктивной поперечной силы в колоннах связевого каркаса многоэтажных зданий;

• фиксирующие пластины при восприятии поперечной силы за счет трения по плоскости контакта, приваренные к внутренним граням нижней трубы, незначительно влияют на работу контактного узла, наличие небольших местных зон с напряжениями, достигающими временного сопротивления, не ведут к исчерпанию прочности монтажного узла.

Быстросборные узлы стального каркаса, в которых конструктивные элементы устанавливаются друг на друга и передают продольные усилия и изгибающие моменты через фрезерованные поверхности при использовании минимального числа фиксирующих элементов, являются перспективным направлением при проектировании многоэтажных каркасов и требуют дальнейшего изучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование металлических конструкций / под ред. А.Р. Туснина. М., 2020. 436 с.
2. Heinisuo M., Laasonen M., Ronni H. Integration of joint design of steel structures using product model // Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering ICCBE. 2010. Pp. 323–328.

3. Hasançebi O. Cost efficiency analyses of steel frameworks for economical design of multi-storey buildings // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 128. Pp. 380–396. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.09.002
4. Pershakov V., Bieliatynskiy A., Bilyk S., Bakulin Y., Pylypenko O., Bolotov G. et al. Structural designs of multy-storey buildings // Proceedings of Na-

tional Aviation University. 2019. Vol. 81. Issue 4. DOI: 10.18372/2306-1472.81.14599

5. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural response of modular buildings — an overview // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 16. Pp. 45–56. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.12.008

6. Ma H., Huang Z., Song X., Ling Y. A Study on Mechanical Performance of an Innovative Modular Steel Building Connection with Cross-Shaped Plug-In Connector // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 9. P. 2382. DOI: 10.3390/buildings13092382

7. Chen Z., Khan K., Khan A., Javed K., Liu J. Exploration of the multidirectional stability and response of prefabricated volumetric modular steel structures // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 184. P. 106826. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106826

8. Sendanayake S.V., Thambiratnam D.P., Perera N., Chan T., Aghdamy S. Seismic Mitigation of Steel Modular Building Structures through Innovative Inter-Modular Connections // Heliyon. 2019. Vol. 5. Issue 11. P. e02751. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02751

9. Nadeem G., Safee N.A., Bakar N.A., Karim I.A., Nasir N.A.M. Evaluation of slip behaviour of self-locking modular steel connection // Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 197. P. 107467. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107467

10. Нефедов Г.В. Строительство домов средней этажности на каркасах из легких стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 10–15. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.10-15. EDN YDNMJA.

11. Yao G., Chen Y., Yang Y., Ma X., Men W. Investigation on buckling performance of prefabricated light steel frame materials under the action of random defects during construction // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 16. P. 5666. DOI: 10.3390/ma16165666

12. Baskaran R., Fernando P. Steel frame structure defect detection using image processing and artificial intelligence // 2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON). 2021. DOI: 10.1109/SMARTGENCON51891.2021.9645845

13. Lindner J. Old and new solutions for contact splices in columns // Journal of Constructional Steel Research. 2008. Vol. 64. Issue 7–8. Pp. 833–844. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.026

14. Li D., Uy B., Patel V., Aslani F. Behaviour and design of demountable steel column-column connec-

tions // Steel and Composite Structures. 2016. Vol. 22. Issue 2. Pp. 429–448. DOI: 10.12989/scs.2016.22.2.429

15. Босаков С.В. Контактная задача для торца упругой полуполосы // Наука и техника. 2023. № 22 (2). С. 127–130. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-127-130

16. Snijder H.H., Hoenderkamp J.C.D. Influence of end plate splices on the load carrying capacity of columns // Journal of Constructional Steel Research. 2008. Vol. 64. Issue 7–8. Pp. 845–853. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.020

17. Lim R.Z.C., Looi D.T.W., Chen M.T., Tsang H.H., Wilson J.L. A component-based macro-mechanical model for inter-module connections in steel volumetric buildings // Journal of Constructional Steel Research. 2023. Vol. 207. P. 107954. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107954

18. Yang C., Xu B., Xia J., Chang H., Chen X., Ma R. Mechanical behaviors of inter-module connections and assembled joints in modular steel buildings : a comprehensive review // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 7. P. 1727. DOI: 10.3390/buildings13071727

19. Туснина В.М., Коляго А.А. К вопросу действительной работы податливых узлов стальных каркасов многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 2. С. 28–34. EDN YTCEAU.

20. Bazarchi E., Davaran A., Lamarche C.P., Roy N., Parent S. Experimental and numerical investigation of a novel vertically unconstrained steel inter-modular connection // Thin-Walled Structures. 2023. Vol. 183. P. 110364. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110364

21. Кузнецов С.А. Механика контактного взаимодействия : конспект лекций. 2020. 77 с.

22. Туснин А.П. Стальной каркас малоэтажного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 18–22. EDN ZTTDKX.

23. Туснин А.П., Вараксин П.А. Типовой стальной каркас пятиэтажного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 45–49. EDN SKGHNZ.

24. Туснина О.А. Конструктивные решения узлов стального каркаса для малоэтажных жилых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 23–27. EDNZTTDLR.

25. Abbasi M., Rasmussen K.J.R., Khezri M., Schafer B.W. Experimental investigation of the sectional buckling of built-up cold-formed steel columns // Journal of Constructional Steel Research. 2023. Vol. 203. P. 107803. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107803

Поступила в редакцию 14 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 13 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 13 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Туснин — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор института Промышленного и гражданского строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; tusninar@mgsu.ru;

Иван Владимирович Мыльников — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1234163, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv_2499@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. *Design of metal structures* / ed. A.R. Tushina. Moscow, 2020; 436. (rus.).
2. Heinisuo M., Laasonen M., Ronni H. Integration of joint design of steel structures using product model. *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering ICCBE*. 2010; 323-328.
3. Hasançebi O. Cost efficiency analyses of steel frameworks for economical design of multi-storey buildings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 128:380-396. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.09.002
4. Pershakov V., Bieliatynskiy A., Bilyk S., Bakulin Y., Pylypenko O., Bolotov G. et al. Structural designs of multi-storey buildings. *Proceedings of National Aviation University*. 2019; 81(4). DOI: 10.18372/2306-1472.81.14599
5. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural response of modular buildings — an overview. *Journal of Building Engineering*. 2018; 16:45-56. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.12.008
6. Ma H., Huang Z., Song X., Ling Y. A study on mechanical performance of an innovative modular steel building connection with cross-shaped plug-in connector. *Buildings*. 2023; 13(9):2382. DOI: 10.3390/buildings13092382
7. Chen Z., Khan K., Khan A., Javed K., Liu J. Exploration of the multidirectional stability and response of prefabricated volumetric modular steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 184:106826. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106826
8. Sendanayake S.V., Thambiratnam D.P., Perera N., Chan T., Aghdamy S. Seismic mitigation of steel modular building structures through innovative inter-modular connections. *Heliyon*. 2019; 5(11):e02751. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02751
9. Nadeem G., Safiee N.A., Bakar N.A., Karim I.A., Nasir N.A.M. Evaluation of slip behaviour of self-locking modular steel connection. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 197:107467. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107467
10. Nefedov G.V. Construction of medium-storey residential buildings on frames of light steel thin-walled structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 7:10-15. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.10-15. EDN YDNMJA. (rus.).
11. Yao G., Chen Y., Yang Y., Ma X., Men W. Investigation on buckling performance of prefabricated light steel frame materials under the action of random defects during construction. *Materials*. 2023; 16(16):5666. DOI: 10.3390/ma16165666
12. Baskaran R., Fernando P. Steel frame structure defect detection using image processing and artificial intelligence. *2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*. 2021. DOI: 10.1109/SMARTGENCON51891.2021.9645845
13. Lindner J. Old and new solutions for contact splices in columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008; 64(7-8):833-844. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.026
14. Li D., Uy B., Patel V., Aslani F. Behaviour and design of demountable steel column-column connections. *Steel and Composite Structures*. 2016; 22(2):429-448. DOI: 10.12989/scs.2016.22.2.429
15. Bosakov S.V. Contact problem for the end of elastic half-strip. *Science & Technique*. 2023; 22(2):127-130. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-127-130 (rus.).
16. Snijder H.H., Hoenderkamp J.C.D. Influence of end plate splices on the load carrying capacity of columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008; 64(7-8):845-853. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.020
17. Lim R.Z.C., Looi D.T.W., Chen M.T., Tsang H.H., Wilson J.L. A component-based macro-mechanical model for inter-module connections in steel volumetric buildings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023; 207:107954. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107954
18. Yang C., Xu B., Xia J., Chang H., Chen X., Ma R. Mechanical behaviors of inter-module connections and assembled joints in modular steel buildings : a comprehensive review. *Buildings*. 2023; 13(7):1727. DOI: 10.3390/buildings13071727
19. Tushina V.M., Kolyago A.A. To the issue of actual work of pliable nodes of steel frames of multi-storey buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 2:28-34. EDN YTCEAU. (rus.).
20. Bazarchi E., Davaran A., Lamarche C.P., Roy N., Parent S. Experimental and numerical investigation of a novel vertically unconstrained steel inter-modular connection. *Thin-Walled Structures*. 2023; 183:110364. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110364
21. Kuznetsov S.A. *Mechanics of contact interaction : lecture notes*. 2020; 77. (rus.).

22. Tusnin A.R. Steel framework of a low-rise building. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 11:18-22. EDN ZTTDKX. (rus.).
23. Tusnin A.R., Varaksin P.A. Standard steel frame of a 5-story building. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 10:45-49. EDN SKGHNZ. (rus.).
24. Tusnina O.A. Structural solutions of joints of a steel frame for low-rise residential buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 11:23-27. EDN ZTTDLR. (rus.).
25. Abbasi M., Rasmussen K.J.R., Khezri M., Schafer B.W. Experimental investigation of the sectional buckling of built-up cold-formed steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023; 203:107803. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107803

Received February 14, 2024.

Adopted in revised form on March 13, 2024.

Approved for publication on March 13, 2024.

B I O N O T E S: **Alexander R. Tusnin** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metal and Wooden Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; tusninar@mgsu.ru;

Ivan V. Myl'nikov — postgraduate student of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1234163, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv_2499@mail.ru.

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

Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях

Владимир Николаевич Сидоров¹, Елена Сергеевна Бадина^{1,2,3},
Дмитрий Олегович Климушкин¹

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

² Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)); г. Москва, Россия;

³ Российская академия наук (РАН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предлагается методика учета диссипации энергии для балки Тимошенко путем построения при численном решении задачи матрицы демпфирования на основе модифицированной функции Рэлея. В этой модификации скорость перемещений заменена скоростями линейных и угловых деформаций. Такой подход позволяет учесть рассеяние энергии за счет внутреннего трения в материале при изменении как его объема, так и формы. Представленная методика является перспективной в практических расчетах конструкций, когда сдвиговая жесткость оказывает существенное влияние на их напряженно-деформированное состояние.

Материалы и методы. Рассмотрены несколько апробированных методов учета диссипации энергии, в том числе позволяющих учесть потерю энергии движущейся конструкции при трении о внешнюю среду (внешнее демпфирование) и диссипацию за счет трения в материале конструкции, деформируемой в движении (внутреннее демпфирование). Приводятся методики определения коэффициентов демпфирования для каждого из них. Для расчета стержневых систем используется метод конечных элементов. Матрицы демпфирования выводятся из условия стационарности полной энергии деформирования механической системы в движении, в том числе с учетом скоростей линейных и угловых деформаций.

Результаты. Приведены матрицы демпфирования, пропорциональные скоростям деформаций, полученные на основе модифицированной диссипативной функции Рэлея. Предложена методика определения коэффициента демпфирования с учетом скоростей угловых деформаций.

Выводы. Рассмотренные матрицы демпфирования описывают диссипацию энергии при колебаниях механических систем за счет внутреннего трения в материале. Матрица внутреннего демпфирования получена с учетом влияния скоростей линейных и угловых деформаций для моделирования динамического поведения коротких изгибаемых элементов конструкций, при описании деформирования которых применяется модель Тимошенко. Выполненная проверка размерностей дополнительно подтверждает корректность построения матрицы демпфирования. При этом размерность предложенного коэффициента демпфирования с учетом сдвига такая же, как у широко используемого коэффициента вязкости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диссипация, демпфирование, коэффициенты демпфирования, балка Тимошенко, внутреннее трение в материале, метод конечных элементов, диссипативная функция Рэлея

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сидоров В.Н., Бадина Е.С., Климушкин Д.О. Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 960–970. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Олегович Климушкин, d.o.klimushkin@gmail.com.

Modification of Rayleigh dissipation function for numerical simulation of internal damping in rod structures

Vladimir N. Sidorov¹, Elena S. Badina^{1,2,3}, Dmitriy O. Klimushkin¹

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

² Russian University of Transport (RUT (MIIT)); Moscow, Russian Federation;

³ Russian Academy of Sciences (RAN); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper proposes a method of accounting for energy dissipation for the Timoshenko beam by constructing a damping matrix based on a modified Rayleigh function in the numerical solution of the problem. In this modification,

the velocity of displacements is replaced by the velocities of linear and angular deformations. This approach allows us to take into account energy dissipation due to internal friction in the material when both its volume and shape change. The presented technique is promising in practical calculations of structures when shear stiffness has a significant impact on their stress-strain state.

Materials and methods. Several proven methods of energy dissipation accounting are considered, including those that make it possible to take into account the energy loss of a moving structure during friction with the external environment (external damping) and dissipation due to friction in the material of the structure deformed in motion (internal damping). Methods for determining the damping coefficients for each of them are presented. The finite element method is used to calculate rod systems. Damping matrices are derived from the condition of stationarity of the total energy of deformation of a mechanical system in motion, including linear and angular deformation rates.

Results. Damping matrices proportional to strain rates obtained on the basis of the modified dissipative Rayleigh function are given. A method for determining the damping coefficient taking into account the rates of angular deformation is proposed.

Conclusions. The damping matrices presented in the paper describe the energy dissipation during vibrations of mechanical systems due to internal friction in the material. The internal damping matrix was obtained taking into account the influence of linear and angular deformation rates to simulate the dynamic behaviour of short bending structural elements, the deformation of which is described using the Timoshenko model. The performed dimensional check additionally confirms the correctness of the damping matrix construction. Moreover, the dimension of the proposed shear damping coefficient is the same as that of the widely used viscosity coefficient.

KEYWORDS: dissipation, damping, damping coefficients, Timoshenko beam, material internal friction, finite element method, Rayleigh dissipative function

FOR CITATION: Sidorov V.N., Badina E.S., Klimushkin D.O. Modification of Rayleigh dissipation function for numerical simulation of internal damping in rod structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):960-970. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970 (rus.).

Corresponding author: Dmitry O. Klimushkin, d.o.klimushkin@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование динамического поведения строительных конструкций и их элементов представляет собой актуальную задачу, решение которой часто является важным аргументом при расчетном обосновании конструктивных решений. Разработка новых методов, позволяющих учитывать различные особенности поведения конструкций и материалов, имеет целью повышение достоверности применяемых математических моделей и расширение класса решаемых задач.

Учет сдвиговых деформаций конструкций необходим, когда они включают в себя короткие изгибаемые элементы. В этом случае для описания процесса деформирования изгибаемых элементов применяется модель С.П. Тимошенко [1]. В работе [2] показано, что результаты моделирования колебаний коротких изгибаемых элементов без учета сдвиговых деформаций могут значительно отличаться от результатов эксперимента.

Интеграция модели Тимошенко в алгоритм метода конечных элементов (МКЭ) позволяет решать задачи прочностного расчета сложных стержневых систем. Такие попытки предпринимались, например, в исследованиях [3–5].

Численный расчет различных типов строительных конструкций на динамические воздействия сводится, как правило, к построению их дискретных расчетных моделей и численному решению уравнения движения Д'Аламбера, записанному в перемещениях и определенному в конечномерном пространстве. В таком подходе, в частности при использовании в расчете МКЭ, уравнение Д'Аламбера, формулирующее равновесное состоя-

ние механической системы, деформируемой в движении, записывается в матричном виде [6]:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\bar{\mathbf{V}}}(t) + \mathbf{D} \cdot \dot{\bar{\mathbf{V}}}(t) + \mathbf{K} \cdot \bar{\mathbf{V}}(t) = \bar{\mathbf{F}}(t), \quad (1)$$

где \mathbf{M} , \mathbf{D} и \mathbf{K} — соответственно матрица масс, матрица демпфирования и матрица жесткости расчетной модели; $\bar{\mathbf{V}}(t)$ — вектор перемещений узлов расчетной модели в направлении их степеней свободы; $\bar{\mathbf{F}}(t)$ — вектор внешних силовых воздействий, меняющихся во времени t .

Точки сверху в записи уравнения (1) и далее означают взятие производных по аргументу времени t . Таким образом, первые два слагаемых выражения (1) описывают инертность узлов расчетной модели, проявляющуюся при ее движении, а также противодействие движению демпфирующих сил, проявляющихся при диссипации энергии движения (ее переноса в другие виды энергии).

Существует ряд подходов и методов учета диссипации энергии механической системы, как правило, за счет перехода энергии колебаний, рассеиваемой при движении в тепловую. При этом важно различать трение движущейся механической системы о внешнюю среду и внутреннее трение в ее деформируемом материале. Соответственно одни методы разработаны для учета внешнего демпфирования, другие служат для моделирования затухания колебаний за счет внутреннего трения в материале. Для обоснования каждой модели и каждого метода учета диссипации стоит вопрос о назначении так называемого коэффициента демпфирования, так как именно он становится основным показателем скорости затухания колебаний.

Ниже приведены примеры основных подходов к моделированию демпфирующих сил, построе-

нию матрицы демпфирования, назначению коэффициентов демпфирования и предложены варианты определения значений коэффициента демпфирования для моделирования диссипации энергии за счет внутреннего трения с учетом скоростей изменения как линейных, так и сдвиговых деформаций на примере колебаний балки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование демпфирования за счет трения о внешнюю среду

В наиболее распространенных условиях работы конструкции (ее деформирование при колебаниях в газообразной среде) демпфирование за счет трения о внешнюю среду не часто учитывается в расчетах инженерных, прежде всего строительных, конструкций, так как такое демпфирование имеет незначительный вклад в гашение колебаний. Но при учете полной картины диссипации энергии механической системы, деформируемой в движении, данным видом демпфирования, как правило, пренебрегать нельзя.

Характерным является отображение взаимодействия движущейся конструкции и внешней среды в коэффициенте демпфирования, предложенное Ньюэллом [7] на примере колебаний консольной балки:

$$\zeta = \frac{12 \cdot \mu}{b} \cdot \frac{L^2}{h^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{E \cdot \rho_b}}, \quad (2)$$

где μ — коэффициент вязкости внешней среды; b — размер поперечного сечения элемента из плоскости колебаний; L — длина балочного элемента; h — размер поперечного сечения элемента в плоскости колебаний; ρ_b — плотность материала элемента.

В выражении (2) учтены и геометрические параметры балочного элемента, и вязкость среды, в которой происходят колебания.

В уравнении Д'Аламбера, как и в его дискретном аналоге (1), усилия сопротивления движению конструкции, вызываемые трением о внешнюю среду, пропорциональны скорости движения поверхностных точек конструкции и представляются его вторым слагаемым.

Моделирование демпфирования за счет внутреннего трения

Известны принципиально различные подходы к моделированию внутреннего демпфирования. Построенные в этих подходах модели отличаются не просто выбором пути назначения коэффициентов демпфирования, а прежде всего, самими идеями, заложенными в моделях. Большой класс моделей внутреннего трения основан на описании вязкоупругих свойств материалов [8]. Широкий обзор таких моделей представлен в труде [9]. Описанию внутреннего трения в композитных материалах посвящены работы [10, 11].

Моделирование рассеяния энергии колебаний конструкциями и материалами, не проявляющими частотно-зависимых демпфирующих свойств, требует соответствующих подходов. Необходимо отметить вклад Е.С. Сорокина в создание амплитудно-зависимых моделей внутреннего трения и разработку гипотезы комплексной жесткости [12, 13].

Также распространенным методом численного моделирования внутреннего демпфирования является использование матрицы демпфирования \mathbf{D} в выражении (1), полученной при моделировании трения о внешнюю среду исходя из установления пропорции скоростям перемещений точек механической системы. При этом используются разнообразные методики подбора самого коэффициента демпфирования.

Но также существуют методы, которые для учета диссипации энергии в принципе не используют непосредственно сами матрицы демпфирования \mathbf{D} , а вместо них встраивают в модель комбинации других матриц с коэффициентами пропорциональности. Рассмотрим одну из известных таких моделей, вполне однозначно определяющую путь назначения коэффициента демпфирования.

Рэлеевское демпфирование

Суть метода заключается в том, что матрица демпфирования \mathbf{D} , устанавливающая в уравнении движения интенсивность демпфирующих сил за счет трения (1), складывается из двух матриц, отражающих ключевые внутренние механические свойства конструкции — из матрицы масс \mathbf{M} и матрицы жесткости \mathbf{K} с назначением степени их вклада в гашение колебаний коэффициентами α и β [14]:

$$\mathbf{D} = \alpha \cdot \mathbf{M} + \beta \cdot \mathbf{K}. \quad (3)$$

Эти коэффициенты в модели и можно называть коэффициентами демпфирования. Здесь слагаемое $\alpha \cdot \mathbf{M}$ отвечает за инерционные составляющие гашения колебаний системы, а второе слагаемое в выражении (3) $\beta \cdot \mathbf{K}$ — за «конструкционную» составляющую. Впрочем, участие в модели рэлеевского демпфирования матрицы жесткости \mathbf{K} вполне можно объяснить и тем, что при выводе матрицы демпфирования из условия стационарности функции диссипации Рэлея ее вид с точностью до коэффициента повторяет вид матрицы жесткости, получаемой из условия стационарности потенциальной энергии деформирования механической системы.

В свою очередь, в модели рэлеевского демпфирования (3) существует несколько способов определения коэффициентов α и β . В общем случае они находятся из условия:

$$\alpha + \beta \cdot \omega_i^2 = 2 \cdot \omega_i \cdot \xi_i, \quad (4)$$

где ω — i -я частота собственных колебаний конструкции; ξ_i — коэффициент демпфирования для i -й частоты свободных колебаний.

В данном подходе коэффициент демпфирования ξ представляет логарифмический декремент затухания. Определять его для различных сложных систем возможно теми же путями, какие используются для простейших.

Другой подход к нахождению коэффициентов α и β вытекает из предыдущего и также определяется их зависимостью от собственных частот колебаний [14].

Функция, описывающая график, приведенный на рис. 1, получена из уравнения (4):

$$\xi = \frac{\alpha}{2 \cdot \omega_n} + \frac{\beta \cdot \omega_n}{2}. \quad (5)$$

Из графика на рис. 1 видно, что результирующая функция ξ (5) определяется двумя характерными точками. Отсюда для определения коэффициентов α и β достаточно двух независимых равенств:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \xi_i \cdot \xi_j \cdot \omega_i \cdot \omega_j}{\xi_i \cdot \omega_i + \xi_j \cdot \omega_j}; \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \xi_i \cdot \xi_j}{\xi_i \cdot \omega_i + \xi_j \cdot \omega_j}. \quad (7)$$

Тогда для определения α и β достаточно найти первые две частоты колебаний, поскольку коэффициенты демпфирования определяются свойствами материала и конструктивным решением системы, являясь в этом случае эмпирическими величинами.

Таким образом видно, что в данной методе коэффициент демпфирования зависит от физико-механических параметров материала и конструктивного решения, а значит, от значений собственных частот конструкции, т.е. он отражает внутренние свойства системы и может характеризовать диссипацию энергии посредством внутреннего трения.

Нелокальное демпфирование

Существует ряд подходов к представлению демпфирующих свойств механических систем как аналитическими математическими моделями, так и численными на основе положений нелокальной механики. Численное нелокальное во времени

демпфирование описано в работах В.Н. Сидорова, Е.С. Бадьиной и Е.П. Детины [15, 16].

В настоящей работе рассматривается модель демпфирования, называемая здесь «демпфированием с памятью», т.е. демпфирование определяется скоростью деформирования конструкции не только в рассматриваемый момент времени t , но также и на предшествующем ему временном интервале $t-\tau$. Тогда уравнение движения (1) выглядит следующим образом:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{V}}(t) + \mathbf{D} \cdot \int_0^t G(t-\tau) \cdot \dot{\mathbf{V}}(\tau) d\tau + \mathbf{K} \cdot \mathbf{V}(t) = \mathbf{F}(t), \quad (8)$$

где $G(t-\tau)$ — функция ядра, описывающая степень влияния скорости перемещений в момент времени τ на демпфирование в текущий момент времени t .

Далее ядро представляется в виде функции ошибок:

$$G(t-\tau) = \frac{2 \cdot \mu}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\mu^2 \cdot (t-\tau)^2}, \quad (9)$$

где μ — параметр, определяющий уровень нелокальности демпфирования материала во времени.

Нелокальная модель демпфирования в материале является обобщением вязкоупругой модели [17] и при определенных значениях масштабного параметра μ сводится к ней.

Примечательно, что матрица демпфирования в данном методе выводится из условий минимума уже модифицированного вида классической функции диссипации Рэлея, в котором вместо скоростей перемещений узлов v участвуют скорости деформаций ϵ :

$$\Phi_D = \frac{1}{2} \cdot \chi \cdot \dot{\epsilon}^2, \quad (10)$$

где $\dot{\epsilon}$ — скорость деформаций; χ — коэффициент вязкости материала, Па·с, он находится из выражения:

$$\chi = E \cdot t_k, \quad (11)$$

где E — модуль упругости материала; t_k — так называемое время запаздывания, которое определяется как:

$$t_k = \frac{2 \cdot \xi}{\omega}. \quad (12)$$

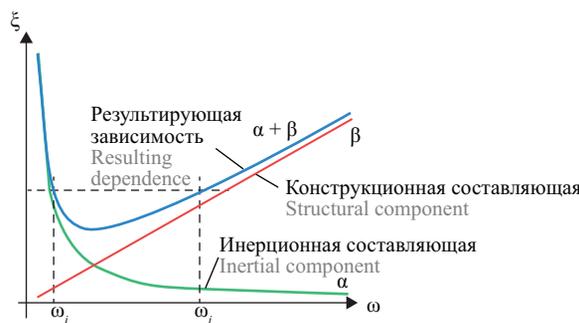


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициентов α и β

Fig. 1. Frequency dependence of the coefficients α and β

В данном выражении ξ — относительный коэффициент демпфирования материала (в долях от критического), ξ зависит от физико-механических свойств материала элементов и конструктивных решений. Величины коэффициента ξ определяются из испытаний строительных конструкций и, как правило, представляются в табличном виде; ω — первая собственная частота конструкции.

Для управления параметрами демпфирования используются сразу два показателя:

1) коэффициент вязкости χ , который является постоянным для элементов расчетной модели, выполненными из одного материала;

2) масштабный параметр μ , который определяется методом наименьших квадратов [18] из условия:

$$\sum_{i=1}^N e_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - f_i(\mu))^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где e_i^2 — квадратичная ошибка в i -й момент времени колебательного процесса; y_i — значения перемещений характерного узла расчетной модели, полученные в момент времени i из эксперимента; f_i — значения перемещений того же узла, полученные с использованием модели, построенной на основе гипотезы нелокального демпфирования; N — количество рассматриваемых временных точек.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Матрица внутреннего демпфирования стержневого конечного элемента

Приведем построение матрицы демпфирования стержневого конечного элемента (КЭ) из условий минимума модифицированной функции диссипации Рэлея (10) относительно скоростей линейных деформаций ε вдоль оси стержневого элемента на примере элемента балки Бернулли – Эйлера [19].

Рассеяние энергии материалом стержневого КЭ составит:

$$D(\dot{v}) = \frac{1}{2} \int_A^l \chi \cdot \dot{\varepsilon}^2 \cdot dA \cdot dz, \quad (14)$$

где A — площадь поперечного сечения стержневого элемента; l — длина конечного элемента; $\dot{\varepsilon}^2$ — линейная деформация материала вдоль оси стержневого элемента; z — ордината вдоль оси стержневого элемента.

Продольная деформация произвольного продольного волокна элемента вдоль оси z состоит из двух слагаемых:

$$\varepsilon = \varepsilon_z^{oc} + \varepsilon_z^{изг}, \quad (15)$$

где ε_z^{oc} — линейная продольная деформация волокон балки при чистом растяжении-сжатии стержневого элемента:

$$\varepsilon_z^{oc} = \frac{du}{dz}, \quad (16)$$

где u — продольное перемещение сечения элемента при его чистом растяжении-сжатии; $\varepsilon_z^{изг}$ — линейная продольная деформация произвольного продольного волокна балочного элемента при его изгибе с соблюдением гипотезы плоских сечений:

$$\varepsilon_z^{изг} = 1/\rho \cdot y = \kappa \cdot y \approx \frac{d^2v}{dz^2} \cdot y, \quad (17)$$

где y — расстояние до рассматриваемого волокна от нейтрального слоя изгибаемого элемента; $\kappa = 1/\rho$ — кривизна линии изгиба (прогибов) элемента $v(z)$.

Таким образом:

$$D(\dot{v}) = \frac{1}{2} \int_A^l \chi \cdot \dot{\varepsilon}^{oc^2} \cdot A dz + \frac{1}{2} \int_A^l \int_A \chi \cdot \dot{\varepsilon}^{изг^2} dA dz, \quad (14б)$$

причем:

$$\int_A (1/\rho \cdot y)^2 dA = J \cdot \kappa^2 \approx J \cdot \left(\frac{d^2v}{dz^2} \right)^2, \quad (18)$$

где J — момент инерции поперечного сечения элемента. Тогда:

$$D(\dot{v}) = \frac{1}{2} A \cdot \chi \int_A^l \left(\frac{d\dot{u}}{dz} \right)^2 dz + \frac{1}{2} J \cdot \chi \int_A^l \left(\frac{d^2\dot{v}}{dz^2} \right)^2 dz. \quad (19)$$

Матрицу демпфирования удобнее и наглядней строить сложением двух матриц, получаемых из условий минимума каждого из двух слагаемых (19) с соблюдением общей нумерации степеней свободы КЭ. Сначала получим матрицу демпфирования стержневого элемента только при его сопротивлении изгибу (из второго слагаемого в выражении (19)).

Согласно алгоритму МКЭ [20] функцию скорости перемещений, перпендикулярных оси стержневого элемента (прогибов) \dot{v} , заменяем приближением \tilde{v} — функцией восполнения узловых значений скоростей перемещений \tilde{v} по длине КЭ с использованием кубической функции формы [N]:

$$\tilde{v}(\xi) = [N] \cdot \bar{v}, \quad (20)$$

где

$$[N]^T = \begin{pmatrix} 1 - 3 \cdot \xi^2 + 2 \cdot \xi^3 \\ l \cdot (\xi - 2 \cdot \xi^2 + \xi^3) \\ 3 \cdot \xi^2 - 2 \cdot \xi^3 \\ l \cdot (-\xi^2 + \xi^3) \end{pmatrix}; \quad (21)$$

$$\bar{v} = \begin{pmatrix} v_0 \\ \varphi_0 \\ v_l \\ \varphi_l \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где v_0, φ_0 — поступательное и угловое перемещение начального узла стержневого элемента; v_l, φ_l — соответствующие перемещения конечного узла элемента длиной l .

При этом выполняем замену переменной (глобальной ординаты z на локальную ξ):

$$z = \xi \cdot l; \quad (23)$$

$$D(\tilde{\mathbf{v}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi \cdot J \cdot \mathbf{A} \tilde{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{A} \tilde{\mathbf{v}} \frac{d\mathbf{z}}{d\xi} d\xi, \quad (24)$$

где $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}^2 \\ \mathbf{l}^2 \cdot d\xi^2 \end{bmatrix}$.

Подставим выражение (20) в (24):

$$D(\bar{\mathbf{v}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi \cdot J \cdot (\mathbf{A}[\mathbf{N}] \cdot \bar{\mathbf{v}}) \cdot (\mathbf{A}[\mathbf{N}] \cdot \bar{\mathbf{v}}) \frac{\mathbf{l} \cdot d\xi}{d\xi} d\xi \quad (25)$$

или

$$D(\bar{\mathbf{v}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi \cdot J \cdot (\mathbf{A}[\mathbf{N}])^T \cdot \mathbf{A}[\mathbf{N}] \cdot \bar{\mathbf{v}} \cdot \bar{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{l} d\xi; \quad (25б)$$

$$D(\bar{\mathbf{v}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \mathbf{S} \bar{\mathbf{v}} \cdot \bar{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{l} d\xi, \quad (26)$$

Участие выражений (14), (26) в выполнении условия стационарности (выполнении уравнения Эйлера для функции Лагранжа (выражения изменения полной энергии деформируемой во времени системы)):

$$\frac{\partial D}{\partial \bar{\mathbf{v}}} = 0, \quad (27)$$

даст в матричном уравнении движения (1) слагаемое:

$$\mathbf{S} \cdot \bar{\mathbf{v}}, \quad (28)$$

где \mathbf{S} — матрица демпфирования материала стержневого КЭ при его сопротивлении изгибу:

$$\mathbf{S} = \int_0^l \chi \cdot J \cdot (\mathbf{A}\mathbf{N})^T \cdot \mathbf{A}\mathbf{N} \cdot \mathbf{l} d\xi. \quad (29)$$

В записи алгоритма МКЭ обычно для удобства вычислений принято в уравнении (29) представлять:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{N}. \quad (30)$$

Вычисляя \mathbf{S} по формуле (29) с учетом (30), получим:

$$\mathbf{S} = \frac{\chi \cdot J}{l^3} \int_0^l \begin{bmatrix} -6+12 \cdot \xi \\ l \cdot (-4+6 \cdot \xi) \\ 6-12 \cdot \xi \\ l \cdot (-2+6 \cdot \xi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{l} d\xi, \quad (31)$$

или

$$\mathbf{S} = 2 \cdot \chi \cdot J \cdot \begin{bmatrix} \frac{6}{l^3} & \frac{3}{l^2} & -\frac{6}{l^3} & \frac{3}{l^2} \\ \frac{3}{l^2} & \frac{2}{l} & -\frac{3}{l^2} & \frac{1}{l} \\ -\frac{6}{l^3} & -\frac{3}{l^2} & \frac{6}{l^3} & -\frac{3}{l^2} \\ \frac{3}{l^2} & \frac{1}{l} & -\frac{3}{l^2} & \frac{2}{l} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Теперь получим слагаемое матрицы демпфирования материала стержневого элемента при его сопротивлении только растяжению-сжатию (из первого слагаемого в выражении (19)).

Заменим функцию скорости осевых перемещений \dot{u} ее приближением \tilde{u} — функцией восполнения двух узловых значений скоростей осевых перемещений \bar{u} по длине КЭ:

$$\tilde{u}(\xi) = [\mathbf{N}] \cdot \bar{\mathbf{u}},$$

где $[\mathbf{N}] = [1-\xi \quad \xi]$, — вектор функции формы (для восполнения скоростей продольных узловых перемещений \bar{u} по длине элемента, примем функцию формы линейной); $\bar{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \dot{u}_0 \\ \dot{u}_l \end{pmatrix}$ — вектор узловых значений осевых перемещений в стержневом элементе.

При этом выполняем замену переменной (глобальной) ординаты z на приведенную локальную ξ , $z = \xi \cdot \mathbf{l}$ (23):

$$D(\tilde{\mathbf{u}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi \cdot A \cdot \mathbf{A} \tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{A} \tilde{\mathbf{u}} \frac{d\mathbf{z}}{d\xi} d\xi, \quad (33)$$

причем в выражении (33) $\mathbf{A} = [d/l \cdot d\xi]$.

$$D(\bar{\mathbf{u}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi \cdot A \cdot (\mathbf{A}[\mathbf{N}] \cdot \bar{\mathbf{u}}) \cdot (\mathbf{A}[\mathbf{N}] \cdot \bar{\mathbf{u}}) \frac{\mathbf{l} \cdot d\xi}{d\xi} d\xi \quad (34)$$

или:

$$D(\bar{\mathbf{u}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi \cdot A \cdot (\mathbf{A}[\mathbf{N}])^T \cdot \mathbf{A}[\mathbf{N}] \cdot \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{l} d\xi. \quad (34б)$$

$$D(\bar{\mathbf{u}}) = \frac{1}{2} \int_0^l \mathbf{S} \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{l} d\xi. \quad (34в)$$

Участие уравнения (15) в выполнении условия стационарности $\partial D / \partial \bar{\mathbf{u}} = 0$ принесет в матричное уравнение движения (1) слагаемое:

$$\mathbf{S} \cdot \bar{\mathbf{u}}, \quad (35)$$

где \mathbf{S} — матрица демпфирования материала стержневого КЭ при его сопротивлении чистому растяжению-сжатию:

$$\mathbf{S} = \int_0^l \chi \cdot A \cdot (\mathbf{A}\mathbf{N})^T \cdot \mathbf{A}\mathbf{N} \cdot \mathbf{l} d\xi \quad (36)$$

или с учетом уравнения (30):

$$\mathbf{S} = \int_0^l \chi \cdot A \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{l} d\xi; \quad (37)$$

$$\mathbf{S} = \chi \cdot A \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{l} & -\frac{1}{l} \\ -\frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Рассматриваемый стержневой КЭ, работающий в плоскости, имеет по три степени свободы в каждом из двух его узлов.

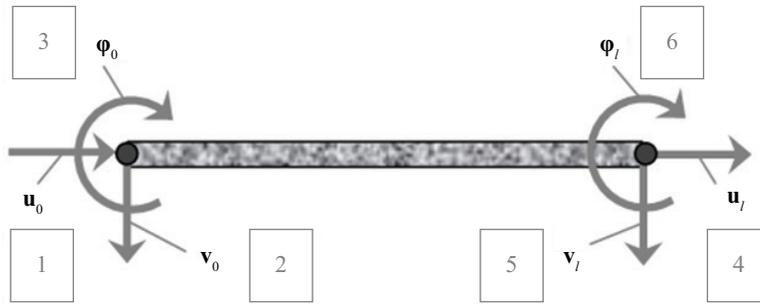


Рис. 2. Нумерация степеней свободы стержневого конечного элемента

Fig. 2. Numbering of degrees of freedom of the rod finite element

Теперь матрицу демпфирования материала стержневого КЭ построим сложением двух матриц (32) и (38), сформированных выше. Суммирование проведем согласно показанной на рис. 2 нумерации степеней свободы КЭ.

$$S = \chi \cdot \begin{bmatrix} \frac{A}{l} & 0 & 0 & -\frac{A}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot J}{l^3} & \frac{6 \cdot J}{l^2} & 0 & -\frac{12 \cdot J}{l^3} & \frac{6 \cdot J}{l^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot J}{l^2} & \frac{4 \cdot J}{l} & 0 & -\frac{6 \cdot J}{l^2} & \frac{2 \cdot J}{l} \\ -\frac{A}{l} & 0 & 0 & \frac{A}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot J}{l^3} & -\frac{6 \cdot J}{l^2} & 0 & \frac{12 \cdot J}{l^3} & -\frac{6 \cdot J}{l^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot J}{l^2} & \frac{2 \cdot J}{l} & 0 & -\frac{6 \cdot J}{l^2} & \frac{4 \cdot J}{l} \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Построение матрицы демпфирования относительно скоростей угловых деформаций

Рассеяние энергии при искажении формы произвольной точки деформируемого тела под действием динамических нагрузок представим следующей диссипативной функцией:

$$\Phi_D^{сдв} = \frac{1}{2} \chi^{сдв} \cdot \dot{\gamma}^2, \quad (40)$$

где $\chi^{сдв}$ — коэффициент вязкости при сдвиге в материале; γ — угловая деформация материала.

Тогда рассеяние энергии материалом стержневого КЭ при сопротивлении деформациям сдвига составит:

$$D(\dot{v}) = \frac{1}{2} \int \int_A \chi^{сдв} \cdot \dot{\gamma}^2 \, dA \, dz, \quad (41)$$

где l — длина конечного элемента; A — площадь поперечного сечения стержневого элемента; z — ордината вдоль оси стержневого элемента.

Согласно теории С.П. Тимошенко [1] угловые деформации γ принимаются приведенными по площади поперечного сечения:

$$D(\dot{v}) = \frac{1}{2} \int_l \chi^{сдв} \cdot A \cdot \dot{\gamma}^2 \, dz. \quad (41б)$$

Функцию скорости угловых деформаций стержневого элемента $\dot{\gamma}$ заменяем приближением $\tilde{\gamma}$ — функцией восполнения узловых значений скоростей угловых деформаций $\tilde{\gamma}$ по длине КЭ с использованием функции формы $[N]$. При этом выразим скорость угловых деформаций $\tilde{\gamma}$ через скорость перемещений узлов \tilde{v}^B .

$$\tilde{\gamma}(\xi) = k \cdot [N] \cdot K_{сдв}^B \cdot \tilde{v}^B, \quad (42)$$

где $[N] = [1 - \xi \quad \xi]$, — вектор линейной функции формы (в этом случае принимаем изменение внутренних поперечных сил Q по длине элемента, а значит, и изменение картины распределения скоростей угловых деформаций по поперечным сечениям элемента по линейному закону); $K_{сдв}^B$ — матрица жесткости КЭ, в которой опущены все строки кроме 2-й и 5-й. Она служит для определения сдвиговых усилий Q в узлах КЭ; $k = 6 \cdot \alpha \cdot E \cdot I / G \cdot A \cdot l^3$ — жесткость в поперечном сечении для определения осредненных угловых деформаций КЭ; G — модуль упругости материала сдвигу; α — коэффициент формы поперечного сечения, учитывающий неравномерность распределения угловых деформаций по поперечному сечению:

$$\tilde{v}^B = \begin{pmatrix} v_0 \\ \phi_0 \\ v_l \\ \phi_l \end{pmatrix}; \quad (22)$$

$$K_{сдв}^B \cdot \tilde{v}^B = Q; \quad (43)$$

$$K_{сдв}^B = \begin{bmatrix} \frac{12 \cdot EJ}{l^3} & \frac{6 \cdot EJ}{l^2} & -\frac{12 \cdot EJ}{l^3} & \frac{6 \cdot EJ}{l^2} \\ -\frac{12 \cdot EJ}{l^3} & -\frac{6 \cdot EJ}{l^2} & \frac{12 \cdot EJ}{l^3} & -\frac{6 \cdot EJ}{l^2} \end{bmatrix}. \quad (44)$$

При этом выполняем замену переменной (глобальной ординаты z на локальную ξ) $z = \xi \cdot l$ (23):

$$D_{сдв}(\tilde{\gamma}) = \frac{1}{2} \int_0^1 \chi^{сдв} \cdot A \cdot \dot{\gamma} \cdot \dot{\gamma} \frac{l \cdot dz}{d\xi} \, d\xi; \quad (45)$$

$$D^{сдв}(\bar{v}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi^{сдв} \cdot A \cdot k^2 \cdot (A[N] \cdot \bar{v}) \times (A[N] \cdot \bar{v}) \frac{1 \cdot d\xi}{d\xi} d\xi \quad (46)$$

или

$$D^{сдв}(\bar{v}) = \frac{1}{2} \int_0^l \chi^{сдв} \cdot A \cdot k^2 \cdot (A[N])^T \cdot A[N] \cdot \bar{v} \cdot \bar{v} \cdot 1 d\xi; \quad (47)$$

$$D^{сдв}(\bar{v}) = \frac{1}{2} \int_0^l S^{сдв} \cdot \bar{v} \cdot \bar{v} \cdot 1 d\xi. \quad (48)$$

Участие уравнения (48) в выполнении условия стационарности изменения полной энергии деформируемой во времени системы:

$$\frac{\partial D^{сдв}}{\partial \bar{v}} = 0 \quad (49)$$

даст в матричном уравнении (1) слагаемое:

$$S^{сдв} \cdot \bar{v}, \quad (50)$$

где $S^{сдв}$ — матрица демпфирования материала стержневого КЭ, пропорциональная скорости изменения сдвиговых деформаций:

$$S^{сдв} = \int_0^l \chi^{сдв} \cdot A \cdot k^2 \cdot (AN)^T \cdot AN \cdot 1 d\xi. \quad (51)$$

Приняв $B = AN$ (30), получим:

$$S^{сдв} = \chi^{сдв} \cdot A \cdot k^2 \int_0^l \begin{matrix} B^* \\ 2-4 \cdot \xi \\ 1 \cdot (1-2 \cdot \xi) \\ -2+4 \cdot \xi \\ l-2 \cdot \xi \cdot l \end{matrix} \cdot \begin{matrix} B \\ 2-4 \cdot \xi \\ 1 \cdot (1-2 \cdot \xi) \\ -2+4 \cdot \xi \\ l-2 \cdot \xi \cdot l \end{matrix} \cdot 1 d\xi, \quad (52)$$

или

$$S^{сдв} = \frac{1}{3} \cdot \chi^{сдв} \cdot A \cdot k^2 \cdot l \cdot \begin{matrix} 4 & 2 \cdot l & -4 & 2 \cdot l \\ 2 \cdot l & l^2 & -2 \cdot l & l^2 \\ -4 & -2 \cdot l & 4 & -2 \cdot l \\ 2 \cdot l & l^2 & -2 \cdot l & l^2 \end{matrix}. \quad (53)$$

Теперь составим матрицу демпфирования для продольного сдвига. Ее выведем согласно теории Д.И. Журавского, которую он использовал для построения формулы касательных напряжений при изгибе балки: продольные касательные напряжения

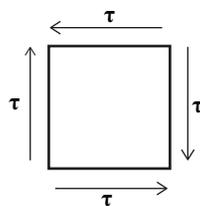


Рис. 3. Распределение касательных напряжений

Fig. 3. Tangential stress distribution

уравновешивают поперечные, они равны им по значению, но обратны по направлению (рис. 3).

Тогда матрица демпфирования при сопротивлении скоростям продольных сдвиговых деформаций примет форму:

$$S^{сдв} = \frac{1}{3} \chi^{сдв} \cdot A \cdot k^2 \cdot l \cdot \begin{matrix} 4 & -4 \\ -4 & 4 \end{matrix}. \quad (54)$$

Суммарная матрица демпфирования при сопротивлении скоростям сдвиговых деформаций, согласно нумерации узловых степеней свободы элемента, приведенной на рис. 2, имеет вид:

$$S^{сдв} = \frac{1}{3} \cdot \chi^{сдв} \cdot A \cdot k^2 \cdot l \cdot \begin{matrix} 4 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \cdot l & 0 & -4 & 2 \cdot l \\ 0 & 2 \cdot l & l^2 & 0 & -2 \cdot l & l^2 \\ -4 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & -2 \cdot l & 0 & 4 & -2 \cdot l \\ 0 & 2 \cdot l & l^2 & 0 & -2 \cdot l & l^2 \end{matrix}. \quad (55)$$

Размерность коэффициента демпфирования при матрице демпфирования, полученной на основе энергетического подхода, исходя из сопротивления скоростям угловых деформаций для балки С.П. Тимошенко

Согласно виду матрицы демпфирования (55), полученной путем модификации диссипативной функции Рэлея (40), размерности ее элементов выглядят следующим образом:

$$S^{сдв} = \chi^{сдв} \cdot M^2 \cdot \frac{1}{M^2} \cdot M \cdot \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & M & 0 & -1 & M \\ 0 & M & M^2 & 0 & -M & M^2 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -M & 0 & 1 & -M \\ 0 & M & M^2 & 0 & -M & M^2 \end{matrix}. \quad (56)$$

Опуская в уравнении движения (1) пока не интересные нас слагаемые, имеем:

$$D \cdot \dot{V}(t) = \bar{F}(t). \quad (16)$$

Подставляя в (16) все размерности его элементов, имеем:

$$\chi^{сдв} \cdot M \cdot \begin{matrix} 1 & 0 & -M & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & M & 0 & -1 & M \\ 0 & M & M^2 & 0 & -M & M^2 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -M & 0 & 1 & -M \\ 0 & M & M^2 & 0 & -M & M^2 \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \frac{M}{c} \\ \frac{M}{c} \\ \frac{1}{c} \\ \frac{M}{c} \\ \frac{M}{c} \\ \frac{1}{c} \end{matrix} = \begin{matrix} H \\ H \\ H \cdot M \\ H \\ H \\ H \cdot M \end{matrix}; \quad (57)$$

$$\chi^{сдв} [H \cdot c / M^2] \rightarrow [Па \cdot c] \rightarrow [кг / M \cdot c]. \quad (58)$$

Размерности коэффициентов, представленные

выше, из метода рэлеевского демпфирования:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \xi_i \cdot \xi_j \cdot \omega_i \cdot \omega_j}{\xi_i \cdot \omega_i + \xi_j \cdot \omega_j} \left[\frac{1}{c} \right]; \quad (66)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \xi_i \cdot \xi_j}{\xi_i \cdot \omega_i + \xi_j \cdot \omega_j} [c]. \quad (76)$$

Размерность коэффициента вязкости:

$$\chi = E \cdot \frac{2 \cdot \xi}{\omega} [\text{Па} \cdot \text{с}] \rightarrow [\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2] \rightarrow [\text{кг} / \text{м} \cdot \text{с}]. \quad (116)$$

Из коэффициентов демпфирования, рассмотренных в данной статье, требуемым полученным размерностям (58) удовлетворяет коэффициент, применяемый в работе [19]. Однако стоит отметить, что матрица демпфирования, используемая в публикации [19], построена относительно скоростей линейных деформаций, в то время как коэффициент $\chi^{\text{сдв}}$ относится к матрице, построенной относительно скоростей угловых деформаций (деформаций сдвига).

Тогда $\chi^{\text{сдв}}$ следует вычислять по следующей формуле:

$$\chi^{\text{сдв}} = G \cdot t_k = \frac{E \cdot t_k}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{\chi}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (59)$$

где ν — коэффициент Пуассона материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье матрицы демпфирования описывают диссипацию энергии при колебаниях механических систем за счет внутреннего трения в материале. Матрица внутреннего демпфирования получена с учетом влияния скоростей линейных и угловых деформаций для моделирования динамического поведения коротких изгибаемых элементов конструкций, при описании деформирования которых применяется модель Тимошенко. Выполненная проверка размерностей дополнительно подтверждает корректность построения матрицы демпфирования. При этом размерность предложенного коэффициента демпфирования с учетом сдвига такая же, как у широко используемого коэффициента вязкости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. М. : Мир, 1976. 669 с.
2. Сидоров В.Н., Бадьина Е.С., Детина Е.П. Численное моделирование колебаний композитных рамных конструкций с учетом демпфирования, нелокального во времени // Механика композиционных материалов и конструкций. 2022. Т. 28. № 4. С. 543–552. DOI: 10.33113/mkkmk.ras.2022.28.04.543_552.08. EDN ATPNWH.
3. Bazoune A. Combined influence of rotary inertia and shear coefficient on flexural frequencies of Timoshenko beam: numerical experiments // Acta Mechanica. 2023. Vol. 234. Issue 10. Pp. 4997–5013. DOI: 10.1007/s00707-023-03648-6
4. Onyia M.E., Rowland-Lato E.O. Finite Element Analysis of Timoshenko Beam Using Energy Separation Principle // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. Vol. 13. Issue 1. P. 28. DOI: 10.37624/ijert/13.1.2020.28-35
5. Дудаев М.А. Матрица жесткости балки Тимошенко в конечно-элементном анализе динамического поведения роторных турбомашин // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 6 (89). С. 59–65. EDN SGIVXX.
6. Bathe K.J., Wilson E.L. Numerical methods in finite element analysis. Prentice-Hall Inc, 1976.
7. Sumali H., Carne T.G. Air-drag damping on micro-cantilever beams. Sandia National Laboratories M/S 1070Albuquerque, NM 87185-1070, 2007.
8. Рейнер М. Реология. М. : Наука. 1965. 223 с.
9. Shitikova M.V., Krusser A.I. Models of viscoelastic materials : a review on historical development and formulation // Advanced Structured Materials. 2022. Pp. 285–326. DOI: 10.1007/978-3-031-04548-6_14
10. Берендеев Н.Н., Зимин Н.В., Леонтьев Н.В., Любимов А.К., Смирнов И.А., Сторожев Е.В. Определение демпфирующих характеристик конструкции со сложной структурой // Проблемы прочности и пластичности. 2013. Т. 75. № 4. С. 323–331. EDN RWPMBH.
11. Arora V., Adhikari S., Vijayan K. FRF-based finite element model updating for non-viscous and non-proportionally damped systems // Journal of Sound and Vibration. 2023. Vol. 552. P. 117639. DOI: 10.1016/j.jsv.2023.117639
12. Сорокин Е.С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания // Исследования по динамике сооружений. М. : Госстройиздат, 1951.
13. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М. : Гос. изд-во лит-ры по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. С. 130.
14. Barabash M.S., Pikul A.V. Material damping in dynamic analysis of structures // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 1970. Vol. 13. Issue 3. Pp. 13–18. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-13-18
15. Потанов В.Д. Об устойчивости стержня при действии детерминированной и стохастической нагрузки с учетом нелокальной упругости и нелокального демпфирования материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 1. С. 9–16. EDN TKTLDH.

16. Sidorov V., Shitikova M., Badina E., Detina E. Review of nonlocal-in-time damping models in the dynamics of structures // *Axioms*. 2023. Vol. 12. Issue 7. P. 676. DOI: 10.3390/axioms12070676
17. Ghavanloo E., Shaat M. General nonlocal Kelvin–Voigt viscoelasticity: Application to wave propagation in viscoelastic media // *Acta Mechanica*. 2022. Vol. 233. Issue 1. Pp. 57–67. DOI: 10.1007/s00707-021-03104-3
18. Шенутько Е.С. Модель нелокального демпфирования материала при расчете стержневых элементов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 119 с.
19. Sidorov V.N., Badina E.S., Detina E.P. Nonlocal in time model of material damping in composite structural elements dynamic analysis // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. Issue 4. Pp. 14–21. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-14-21
20. Сидоров В.Н., Бадина Е.С. Метод конечных элементов в задачах устойчивости и колебаний стержневых конструкций: примеры расчетов в Mathcad и MATLAB : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2021. 173 с.

Поступила в редакцию 15 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 23 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 8 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Николаевич Сидоров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; профессор кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений Института пути, строительства и сооружений; **Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ));** 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; sidorov.vladimir@gmail.com;

Елена Сергеевна Бадина — доцент кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Института пути, строительства и сооружений; **Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ));** 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; старший научный сотрудник отдела механики структурированной и гетерогенной среды Института прикладной механики; **Российская академия наук (РАН);** 125040, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 7; shepitko-es@mail.ru;

Дмитрий Олегович Климушкин — аспирант кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; d.o.klimushkin@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Timoshenko S.P., Gere J. *Mechanics of Materials*. Moscow, Mir Publ., 1976; 669. (rus.).
2. Sidorov V.N., Badina E.S., Detina E.P. Numerical modeling for oscillations of composite frames accounting for time-nonlocal damping. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2022; 28(4):543-552. DOI: 10.33113/mkkm.ras.2022.28.04.543_552.08. EDN ATPNWH. (rus.).
3. Bazoune A. Combined influence of rotary inertia and shear coefficient on flexural frequencies of Timoshenko beam: numerical experiments. *Acta Mechanica*. 2023; 234(10):4997-5013. DOI: 10.1007/s00707-023-03648-6
4. Onyia M.E., Rowland-Lato E.O. Finite element analysis of timoshenko beam using energy separation principle. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020; 13(1):28. DOI: 10.37624/ijert/13.1.2020.28-35
5. Dudaev M. Timoshenko beam stiffness matrix in finite element analysis of turbomachine dynamic behavior. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014; 6(89):59-65. EDN SGIVXX. (rus.).
6. Bathe K.J., Wilson E.L. *Numerical methods in finite element analysis*. Prentice-Hall Inc, 1976.
7. Sumali H., Carne T.G. *Air-Drag Damping on Micro-Cantilever Beams*. Sandia National Laboratories M/S 1070Albuquerque, NM 87185-1070, 2007.
8. Reiner M. *Rheology*. Moscow, Nauka, 1965; 223. (rus.).
9. Shitikova M.V., Krusser A.I. Models of viscoelastic materials : a review on historical development and formulation. *Advanced Structured Materials*. 2022; 285-326. DOI: 10.1007/978-3-031-04548-6_14
10. Berendeyev N.N., Zimin N.V., Leontyev N.V., Lyubimov A.K., Smirnov I.A., Storozhev E.V. Determining damping characteristics of a compound structure.

Problems of Strength and Plasticity. 2013; 75(4):323-331. EDN RWPMBH (rus.).

11. Arora V., Adhikari S., Vijayan K. FRF-based finite element model updating for non-viscous and non-proportionally damped systems. *Journal of Sound and Vibration*. 2023; 552:117639. DOI: 10.1016/j.jsv.2023.117639

12. Sorokin E.S. Method of taking into account inelastic resistance of the material when calculating structures for vibrations. *Studies on the Dynamics of Structures*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1951. (rus.).

13. Sorokin E.S. *To the theory of internal friction in oscillations of elastic systems*. Moscow, State publishing house of literature on construction, architecture and building materials, 1960; 130. (rus.).

14. Barabash M.S., Pikul A.V. Material damping in dynamic analysis of structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 1970; 13(3):13-18. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-13-18

15. Potapov V.D. On the stability of a rod under deterministic and stochastic loading with allowance for nonlocal elasticity and nonlocal material damping. *Jour-*

nal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015; 1:9-16. EDN TKTLDH (rus.).

16. Sidorov V., Shitikova M., Badina E., Detina E. Review of nonlocal-in-time damping models in the dynamics of structures. *Axioms*. 2023; 12(7):676. DOI: 10.3390/axioms12070676

17. Ghavanloo E., Shaat M. General nonlocal Kelvin–Voigt viscoelasticity: Application to wave propagation in viscoelastic media. *Acta Mechanica*. 2022; 233(1):57-67. DOI: 10.1007/s00707-021-03104-3

18. Shepit'ko E.S. *Non-local material damping model for the calculation of rod elements : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2019; 119. (rus.).

19. Sidorov V.N., Badina E.S., Detina E.P. Nonlocal in time model of material damping in composite structural elements dynamic analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(4):14-21. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-14-21

20. Sidorov V.N., Badina E.S. *Finite element method in problems of stability and vibrations of rod structures: examples of calculations in Mathcad and MATLAB : study guide*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 173. (rus.).

Received April 15, 2024.

Adopted in revised form on April 23, 2024.

Approved for publication on May 8, 2024.

B I O N O T E S : **Vladimir N. Sidorov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Academician of the RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures of the Institute of Railways, Construction and Structures; **Russian University of Transport (RUT (MIIT))**; build. 9, GSP-4, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation; sidorov.vladimir@gmail.com;

Elena S. Badina — Associate Professor of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design Systems of the Institute of Track, Construction and Structures; **Russian University of Transport (RUT (MIIT))**; build. 9, GSP-4, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation; senior researcher of the Department of Mechanics of Structured and Heterogeneous Environments, Institute of Applied Mechanics; **Russian Academy of Sciences (RAN)**; 7 Leningradsky pr., Moscow, 25040, Russian Federation; shepitko-es@mail.ru;

Dmitriy O. Klimushkin — postgraduate student of the Department of Informatics and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; postgraduate student of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, d.o.klimushkin@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Влияние климата и наружной штукатурки на влажностный режим каменных стен

Ростислав Александрович Горшков¹, Сергей Валерьевич Корниенко²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование выполнено для установления возможных причин повреждения отделочных штукатурных покрытий на фасадах исторических каменных зданий, построенных в Санкт-Петербурге до 1917 г., в результате их переувлажнения и последующего морозного разрушения.

Материалы и методы. Изучен механизм увлажнения оштукатуренной с двух сторон однородной стеновой конструкции вследствие переноса влаги из помещения в окружающую среду через толщу стены за счет разности парциальных давлений водяного пара изнутри и снаружи помещения в холодный период года. Построены графики распределения действительного и максимального парциальных давлений водяного пара по толщине стеновой конструкции в зависимости от типа штукатурного покрытия применительно для двух расчетных случаев — для условий наиболее холодного месяца и наиболее холодной пятидневки в Санкт-Петербурге.

Результаты. Выявлено, что для условий наиболее холодного месяца в Санкт-Петербурге действительное парциальное давление водяного пара по толщине рассматриваемой стеновой конструкции не превышает максимальное, что свидетельствует об отсутствии условий для конденсации влаги в толще стенового ограждения. Однако по мере уменьшения паропроницаемости наружной штукатурки на границе соприкосновения каменного основания и штукатурного покрытия происходит сближение кривых распределения действительного и максимального парциальных давлений. Для условий наиболее холодной пятидневки действительное парциальное давление водяного пара уже на расстоянии 135 мм от внутренней поверхности превышает максимальное парциальное давление, что свидетельствует о высоком риске конденсации влаги, и этот риск тем выше, чем менее паропроницаемым оказывается штукатурное покрытие.

Выводы. Доказано, что при установлении наиболее холодных температур наружного воздуха существует высокая вероятность конденсации водяного пара в толще рассматриваемой стеновой конструкции. Наиболее высокий риск замерзания конденсирующейся влаги будет наблюдаться на границе соприкосновения каменного основания с наружной штукатуркой. Замерзание влаги в трещинах и пустотах контактной зоны каменного основания и штукатурного покрытия может приводить к заземлению воды, возникновению значительных внутренних напряжений в отделочном слое и, как следствие, к его постепенному повреждению, вплоть до выпадения отдельных фрагментов штукатурки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: исторические здания, наружные стены, каменная кладка, штукатурка, увлажнение, влажностный режим, замерзание влаги, морозостойкость, трещины, морозное разрушение

Благодарности. Авторы выражают благодарность известному специалисту каменных конструкций доктору технических наук, профессору Роману Болеславовичу Орловичу за полезные замечания и профессиональные советы при подготовке статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горшков Р.А., Корниенко С.В. Влияние климата и наружной штукатурки на влажностный режим каменных стен // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 971–981. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.971-981

Автор, ответственный за переписку: Ростислав Александрович Горшков, rostalsgor@gmail.com.

Influence of climate and external plaster on the humidity conditions of masonry walls

Rostislav A. Gorshkov¹, Sergey V. Kornienko²

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI); Saint Petersburg, Russian Federation;

² Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study was carried out to determine the possible causes of damage to the finishing plaster coverings on the facades of historical stone buildings, built in St. Petersburg before 1917, as a result of their humidification and subsequent frost destruction.

Materials and methods. The mechanism of humidification of a homogeneous wall structure plastered on both sides due

to the moisture transfer from the room to the environment through the wall thickness due to the difference in partial pressures of water vapour from inside and outside the room during the cold season is studied. The paper provides the graphs of the distribution of the actual and maximum partial pressures of water vapour over the thickness of the wall structure, depending on the type of plaster covering, for two calculated cases — for the conditions of the coldest month and the coldest five-day period in St. Petersburg.

Results. It is revealed that for the conditions of the coldest month in St. Petersburg, the actual partial pressure of water vapour in the thickness of the wall structure under consideration does not exceed the maximum, which indicates the absence of conditions for moisture condensation in the thickness of the wall envelope. However, as the vapour permeability of the external plaster decreases, the curves of the distribution of the actual and maximum partial pressures converge at the interface of the stone base and the plaster covering. For the conditions of the coldest five-day period, the actual partial pressure of water vapour already at a distance of 135 mm from the inner surface exceeds the maximum partial pressure, which indicates a high risk of moisture condensation, and this risk is the higher the less vapour permeable the plaster covering is.

Conclusions. It is proven that when the coldest outdoor temperatures are established, there is a high probability of condensation of water vapour in the thickness of the wall structure under consideration. The highest risk of freezing of the condensable moisture will be observed at the interface of stone base with the external plaster. Freezing of moisture in cracks and voids in the contact zone of the stone base and the plaster covering can lead to water trapping, the occurrence of significant internal stresses in the finishing layer and, as a result, to its gradual damage, up to the loss of individual fragments of plaster.

KEYWORDS: historical buildings, external walls, masonry, plaster, humidification, moisture conditions, moisture freezing, frost resistance, cracks, frost destruction

Acknowledgments. The authors express their gratitude to a well-known specialist of masonry structures, Doctor of Technical Sciences, Professor Roman Boleslavovich Orlovich for useful comments and professional advice during the preparation of the paper.

FOR CITATION: Gorshkov R.A., Kornienko S.V. Influence of climate and external plaster on the humidity conditions of masonry walls. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):971-981. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.971-981 (rus.).

Corresponding author: Rostislav A. Gorshkov, rostalsgor@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Санкт-Петербурге участились случаи падения фрагментов наружной штукатурки на тротуары, внутридомовую территорию и проезжую часть дорог. Падение штукатурки влечет за собой риск травмирования пешеходов, а также повреждения транспортных средств и дорожных покрытий.

В Санкт-Петербурге расположено наибольшее количество по стране исторических каменных зданий [1], большинство из которых имеют наружный отделочный слой из штукатурки. В связи с этим вопросы обеспечения долговечности и надежности штукатурных покрытий исторических каменных зданий являются важными (рис. 1, 2).

Один из механизмов разрушения отделочного штукатурного покрытия наружных каменных стен — появление влаги в толще стенового ограждения, замораживание поровой влаги при отрицательных температурах и последующее его разрушение в результате воздействия знакопеременных температур [2–10].

Для исторических каменных зданий строительный, эксплуатационный и гигроскопический типы влагонакопления неактуальны, так как процесс их возведения давно завершен, технологические факторы маловероятны, а все материалы, которые могут способствовать накоплению гигроскопической влаги в материалах стенового ограждения, уже реализовались. Грунтовая влага, особенно при недостаточно надежной горизонтальной гидроизоляции, может приводить к намоканию наружных слоев кирпичной кладки, но высота ее воздействия,

а следовательно, и высота повреждений штукатурки оказываются незначительными.

Капиллярный подсос влаги в каменной кладке также незначителен, поскольку мелкие капилляры в кирпиче прерываются по высоте каменной кладки растворными швами с более высокой пористостью, что в значительной степени замедляет процесс подъема влаги [11, 12].

Воздействие атмосферной влаги нельзя исключать, однако его детальное рассмотрение требует проведения лабораторных и натурных исследований, длительных, дорогостоящих и, как правило, недостаточно полно отраженных в стандартах [13, 14].

В рамках настоящего исследования рассмотрен механизм увлажнения оштукатуренной с двух сторон однородной ограждающей конструкции вследствие переноса влаги из помещения в окружающую среду через толщу стены за счет разности парциальных давлений водяного пара изнутри и снаружи помещения в холодный период года.

Паропроницаемость каменного основания наружной стены и штукатурного покрытия могут в той или иной мере отличаться друг от друга. Как правило, паропроницаемость отделочного покрытия наружной стены ниже, чем у основания. В этой связи на границе материалов с различающимися характеристиками может происходить накопление водяного пара и его последующая конденсация из-за градиента температур по толщине стены. Чем ниже паропроницаемость внешнего штукатурного слоя, тем более интенсивным следует ожидать процесс накопления влаги в толще стенового ограждения и на границе слоев с различающимися тепловлажностными характеристиками. В связи с этим интерес представляет



Рис. 1. Разрушение отделочного слоя штукатурного покрытия

Fig. 1. Destruction of the finishing layer of the plaster covering

оценка влажностного режима однородных каменных стен исторических зданий в зависимости от типа наружной штукатурки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выбрана стеновая конструкция из полнотелого глиняного (керамического) кирпича толщиной 640 мм (в два с половиной кирпича) с внутренним и наружным штукатурным покрытием. С учетом толщины внутренней (15 мм) и наружной (20 мм) штукатурки суммарная толщина стеновой конструкции составляет 675 мм. Объект исследования расположен в Санкт-Петербурге.

Толщина стен в два с половиной кирпича характерна для большинства исторических зданий, построенных в Санкт-Петербурге до 1917 г. [15, 16].

Характеристики климата для расчета влажностного режима:

- температура наружного воздуха наиболее холодного месяца (января) — минус 6,6 °С;
- температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 — минус 24 °С;
- относительная влажность воздуха — 86 %.

В настоящее время большинство исторических каменных зданий в Санкт-Петербурге являются жилыми, в связи с чем расчетные параметры внутреннего воздуха в помещениях приняты следующими:

- температура — 20 °С;
- относительная влажность — 55 %.

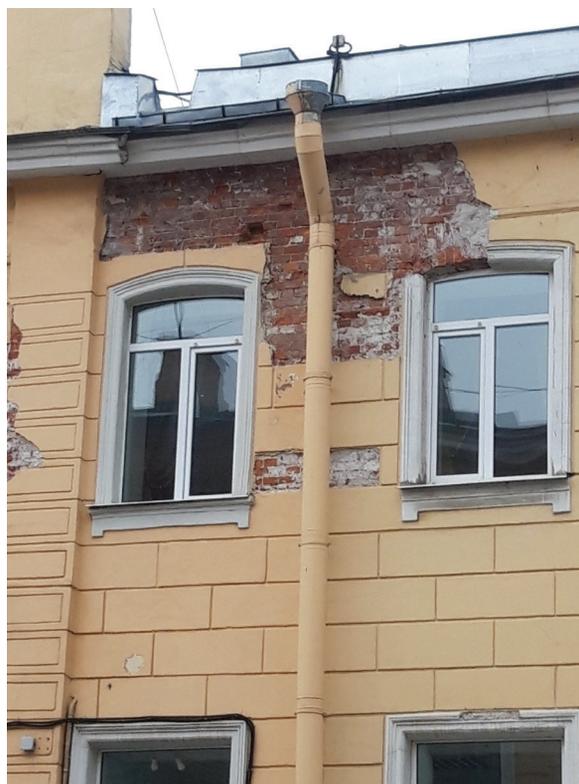


Рис. 2. Повреждение штукатурного покрытия с выпадением отдельных его фрагментов

Fig. 2. Damage to the plaster covering with the loss of its fragments

Теплофизические характеристики материалов стенового ограждения (по данным СП 23-101)

Thermal characteristics of wall envelope materials according to CP 23-101

Номер/тип слоя Layer type	Толщина, мм Thickness, mm	Характеристики в сухом состоянии Characteristics in dry condition		Расчетные характеристики при условиях эксплуатации Б Design characteristics by operating conditions B		
		плотность, кг/м ³ density, kg/m ³	теплопроводность, Вт/(м·К) thermal conductivity, W/(m·K)	массовое отношение влаги, % mass moisture ratio, %	теплопроводность, Вт/(м·К) thermal conductivity, W/(m·K)	паропроницаемость, мг/(м·ч·Па) vapour permeability, mg/(m·h·Pa)
1	<i>Внутренняя штукатурка Internal plaster</i>					
–	15	1600	0,47	4	0,81	0,12
2	<i>Каменное основание Masonry</i>					
–	640	1800	0,56	2	0,81	0,11
3	<i>Наружная штукатурка (по типам) External plaster (by type)</i>					
3.1	20	1600	0,47	4	0,81	0,12
3.2	20	1700	0,52	4	0,87	0,098
3.3	20	1800	0,58	4	0,93	0,090

Влажностный режим помещений (по табл. 1 СП 50.13330) — нормальный.

Расчетные условия эксплуатации наружных ограждающих конструкций (по данным табл. 2 СП 50.13330) — Б.

Для моделирования влажностного режима выбранного объекта исследования рассмотрены три типа наружной штукатурки (табл.):

- известково-песчаная (тип 3.1);
- на основе сложного раствора (тип 3.2);
- цементно-песчаная (тип 3.3).

Расчетные теплофизические характеристики материалов рассматриваемой стеновой конструкции представлены в таблице.

Из данных таблицы следует, что паропроницаемость известково-песчаной штукатурки выше, чем у каменного основания, т.е. материал с такими свойствами будет способствовать выведению водяного пара из ограждения в холодный период года. Паропроницаемость сложного раствора, состоящего из песка, извести и цемента, и цементно-песчаного раствора, ниже паропроницаемости каменной кладки, ввиду чего существует высокая вероятность накопления и последующей конденсации водяного пара на границе раздела каменного основания и штукатурного покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследования представлены на рис. 3, 4.

Из рис. 3 видно, что по мере уменьшения паропроницаемости наружной штукатурки ближе к границе соприкосновения каменного основания и штукатурного покрытия происходит сближение кривых

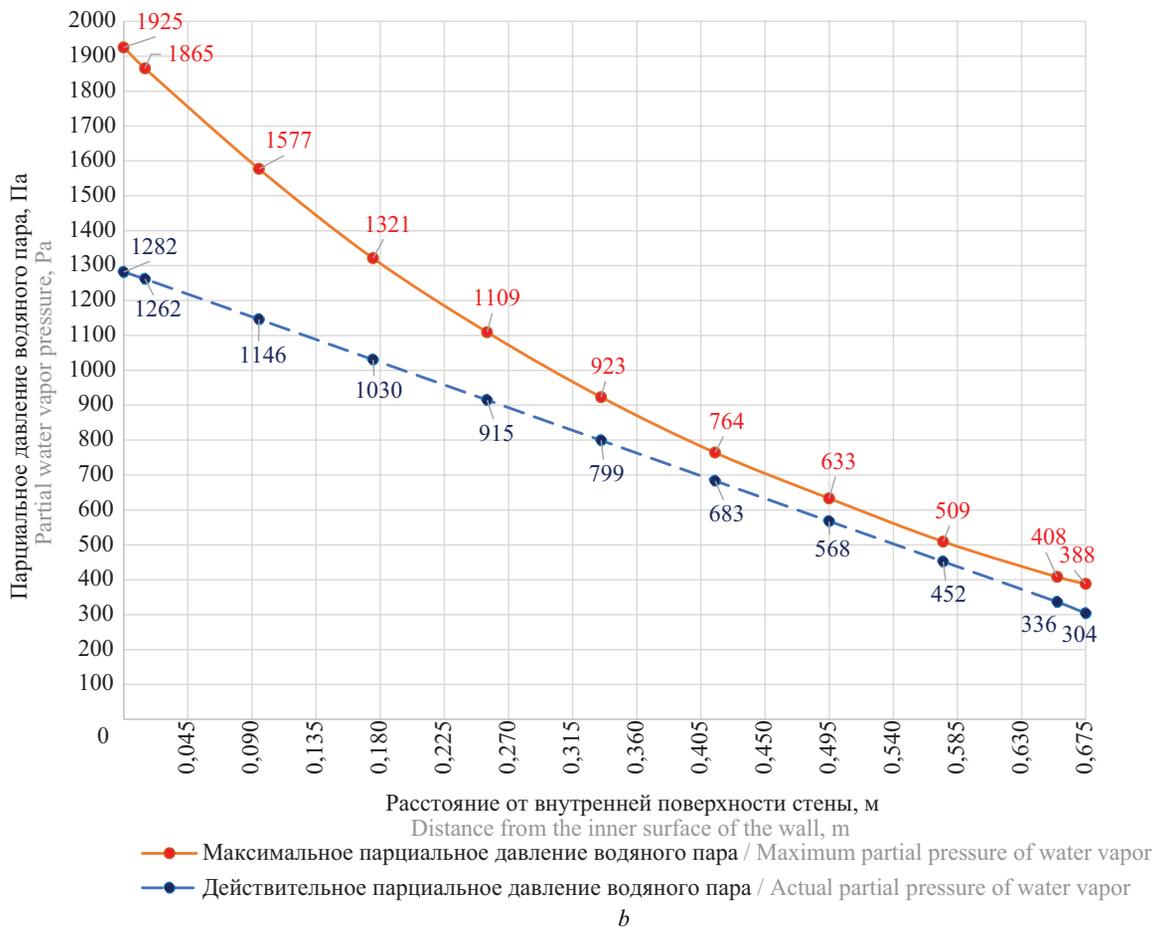
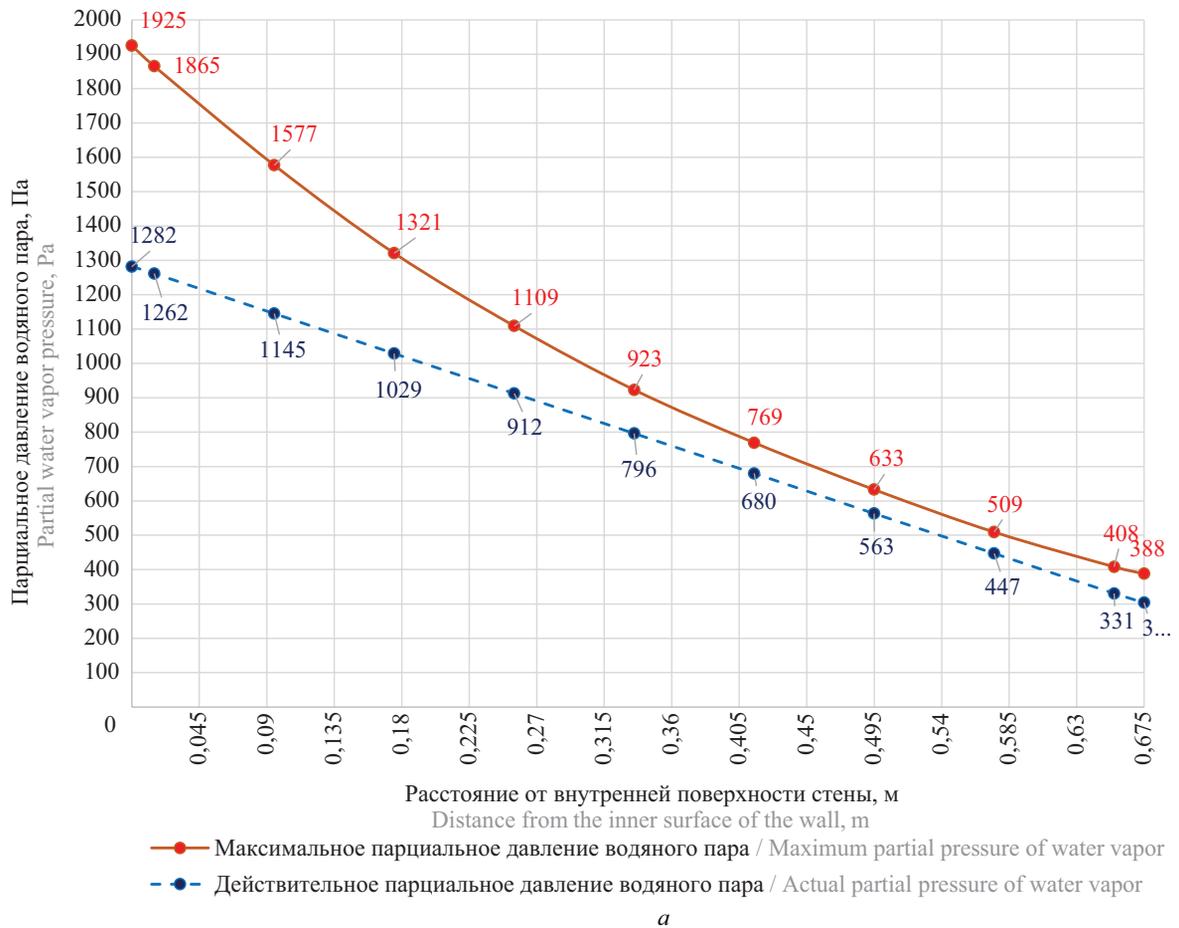
распределения действительного и максимального парциальных давлений водяного пара, однако наложения их не наблюдается, что при принятых граничных условиях свидетельствует о невысокой вероятности конденсации влаги в толще стенового ограждения.

Иная ситуация наблюдается для условий наиболее холодной пятидневки (рис. 4). Уже начиная с расстояния 135 мм от внутренней поверхности стены, существует риск образования конденсата для всех типов наружных штукатурных покрытий.

С учетом распределения температуры внутри рассматриваемого стенового ограждения в зоне отрицательных температур высока вероятность замерзания конденсирующейся в порах стеновых материалов влаги с последующим их морозным разрушением.

Следует отметить, что ввиду малости влияния теплофизических свойств штукатурных покрытий на общее сопротивление теплопередаче рассматриваемой стеновой конструкции распределение температур по ее толщине практически не зависит от типа штукатурного покрытия.

Замерзание конденсационной влаги в порах стеновых материалов приводит к образованию ледяной прослойки, значительно замедляющей миграцию пара из стены наружу, в результате чего происходит более интенсивное накопление влаги внутри конструкции стены. Данное обстоятельство никак не отражается в приведенных выше расчетах влажностного режима ограждающих конструкций, однако выявляется в ходе лабораторных исследований [17, 18].



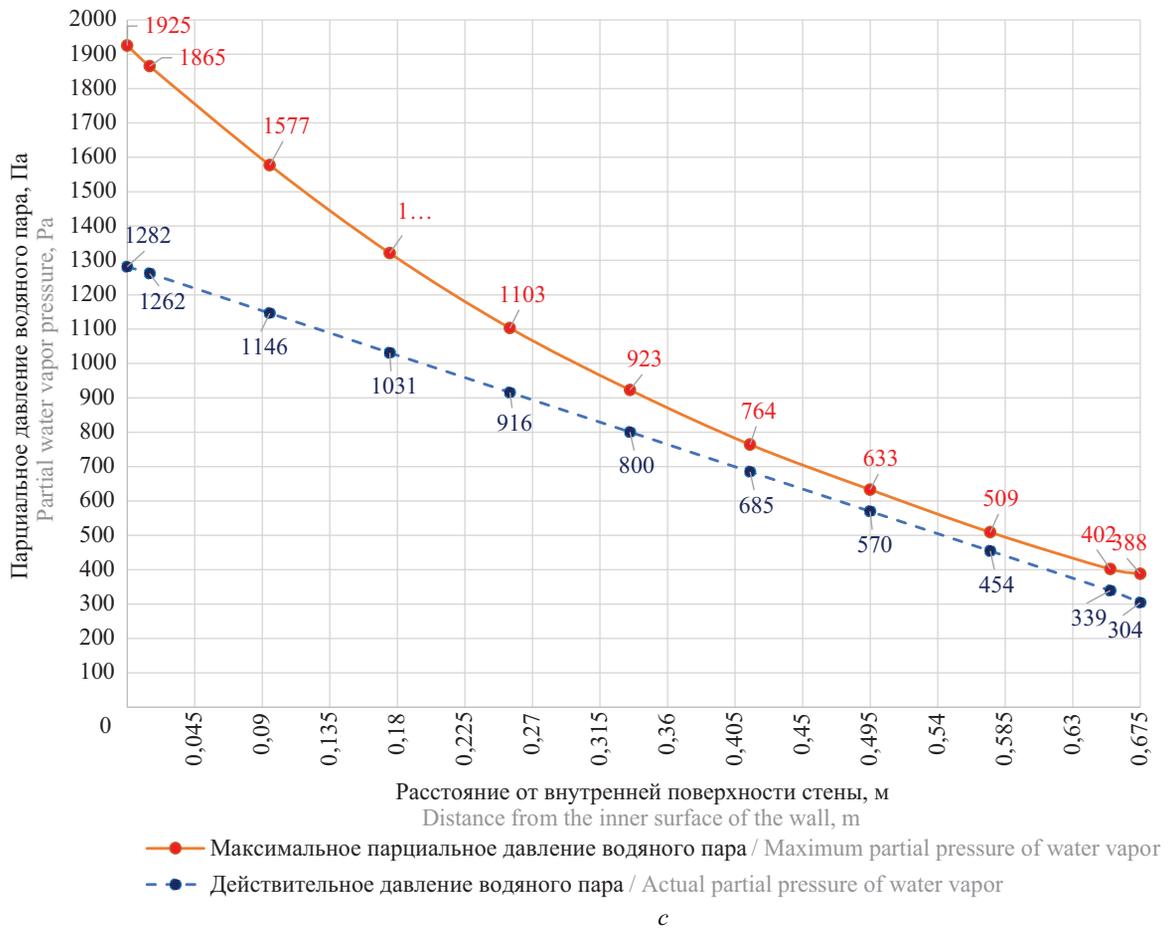
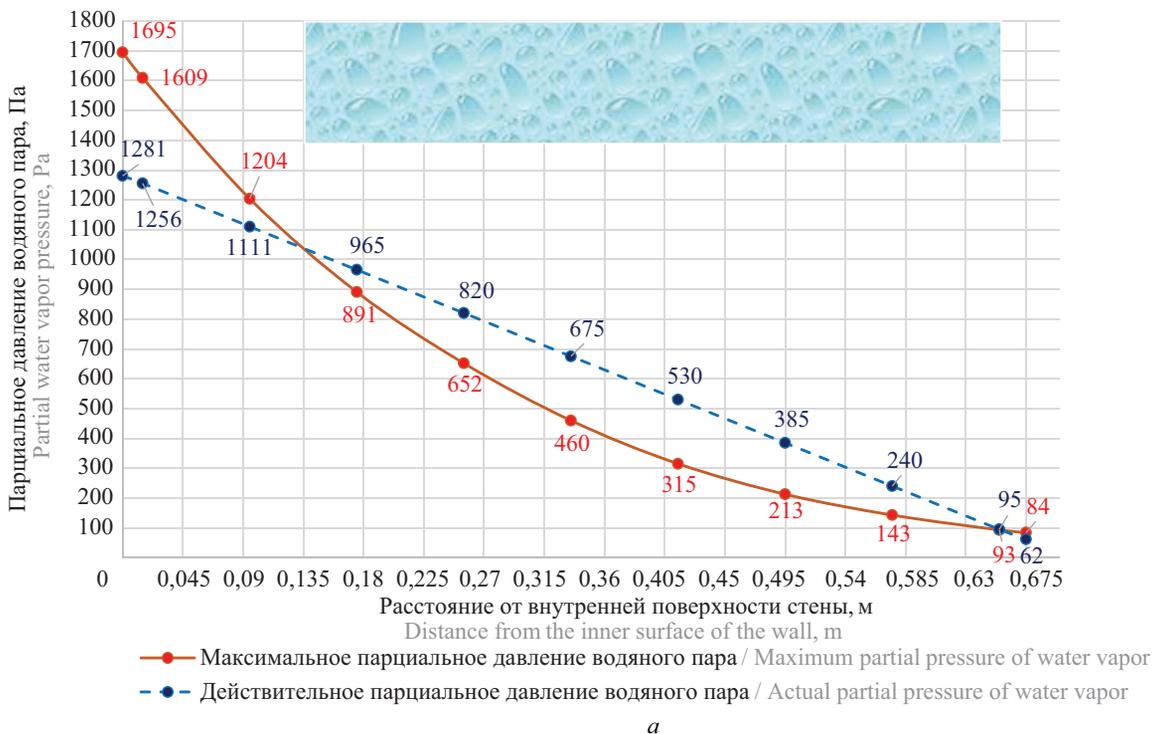


Рис. 3. Распределение парциальных давлений водяного пара по толщине стеновой конструкции с наружным штукатурным покрытием из известково-песчаного раствора (а); сложного раствора (b); цементно-песчаного раствора (с) для условий наиболее холодного месяца

Fig. 3. Distribution of partial pressures of water vapour along the thickness of the wall structure with an external plaster covering based on lime-sand mortar (a); complex mortar (b); cement-sand mortar (c) for the conditions of the coldest month



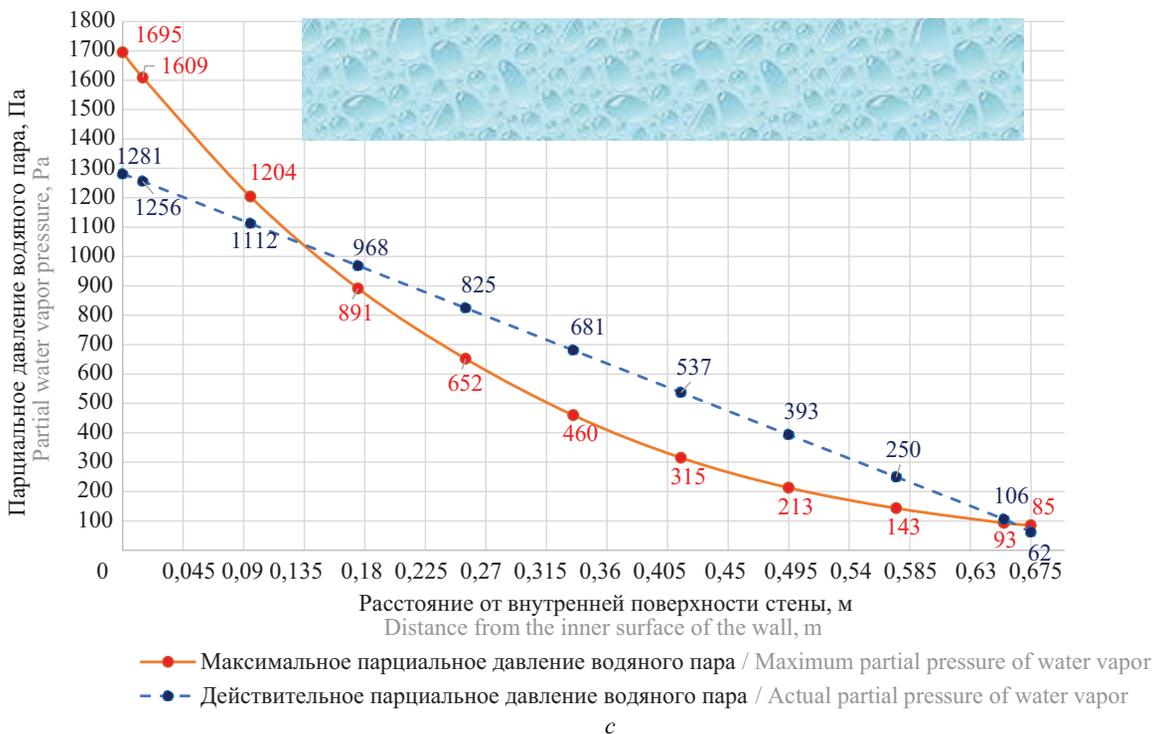
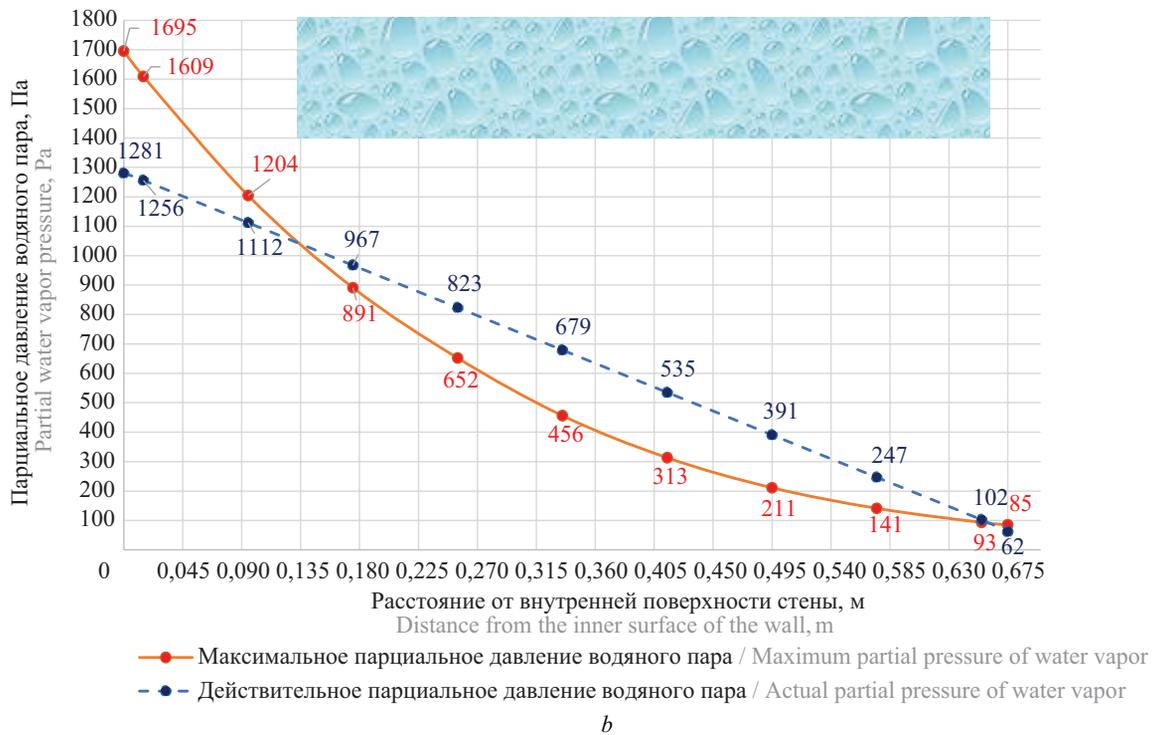


Рис. 4. Распределение парциальных давлений водяного пара по толщине стеновой конструкции с наружным штукатурным покрытием из известково-песчаного раствора (а); сложного раствора (б); цементно-песчаного раствора (с) для условий наиболее холодной пятидневки

Fig. 4. Distribution of partial pressures of water vapour along the thickness of a wall structure with an external plaster covering based on lime-sand mortar (a); complex mortar (b); cement-sand mortar (c) for the conditions of the coldest five-day period

Рассмотренная выше модель не лишена недостатков, среди которых можно выделить:

1. Метод расчета влажностного режима по стационарным условиям переноса парообразной влаги является ориентировочным и не в полной мере отражает реальную картину изменения влажности ма-

териалов ограждающей конструкции ввиду того, что процессы диффузии водяного пара протекают медленно (влагоинерционный эффект).

2. Слабым местом данного метода служит также то обстоятельство, что он позволяет установить лишь возможность конденсации влаги, но не дает возмож-

ности определить влажность материалов ограждающей конструкции и степень их насыщения влагой.

При выявлении плоскости конденсации в наиболее холодный месяц года целесообразно установить годовой баланс влаги в конструкции, что позволит выяснить, происходит ли в рассматриваемой стеновой конструкции систематическое накопление влаги или влага, конденсированная в холодный период года, успевает испариться из конструкции в течение теплого периода. Такие условия более подробно рассмотрены в исследованиях [19–24]. Для получения более точных результатов расчет влажностного режима ограждающих конструкций желательнее проводить по нестационарным условиям с учетом совместного переноса влаги в парообразной и жидкой фазах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из полученных результатов следует, что при наиболее низких температурах наружного воздуха становится вероятной конденсация влаги в порах стеновых материалов, которая в области отрицательных температур может переходить в твердое агрегатное состояние. При этом необходимо иметь в виду, что температура начала замерзания влаги в большинстве строительных материалов и изделий, применяемых в составе наружных стеновых конструкций, отличается от 0 °С. Этому способствуют два фактора:

- наличие солей в каменной кладке или штукатурном покрытии, которые понижают температуру замерзания жидкости (например, температура замерзания насыщенного раствора поваренной соли составляет –21,2 °С). Однако стоит отметить, что в кладке исторических зданий химически активных солей со временем остается крайне мало, а их новое появление возможно только в цокольной части наружных стен вследствие обработки тротуаров прогивогололедными реагентами;

- заземленная в полостях или трещинах вода находится под давлением, ввиду чего замерзает при более низких температурах.

Механизм заземления влаги может являться одной из причин разрушения штукатурки в зоне ее контакта с каменным основанием.

Дальнейшее понижение температуры приводит к замерзанию и увеличению в объеме заземленных

слоев воды, что сопровождается возникновением значительных внутренних напряжений в отделочном слое. Лед и заземленная в пустотах и трещинах вода оказывают расклинивающее воздействие на штукатурку, что при знакопеременных температурных воздействиях приводит к постепенному ее отделению от основания, вплоть до выпадения отдельных фрагментов.

Результаты выполненного исследования показывают:

- для условий наиболее холодного месяца в Санкт-Петербурге по мере уменьшения паропроницаемости наружной штукатурки происходит сближение кривых распределения действительного и максимального парциальных давлений на границе соприкосновения основания и штукатурного покрытия. Однако по всей толщине рассматриваемого ограждения действительное парциальное давление водяного пара не превышает максимальное, что свидетельствует об отсутствии условий для конденсации влаги в толще стенового ограждения;

- для условий наиболее холодной пятидневки действительное парциальное давление водяного пара уже на расстоянии 135 мм от внутренней поверхности превышает максимальное парциальное давление, что свидетельствует о высоком риске конденсации влаги, и этот риск тем выше, чем менее паропроницаемым оказывается штукатурное покрытие;

- в зоне конденсации влаги при отрицательных температурах возможно образование ледяного барьера, препятствующего миграции влаги из толщи стены наружу и способствующего более интенсивному накоплению влаги, не учитываемого расчетными моделями;

- с учетом распределения температуры по толщине рассматриваемой стеновой конструкции существует риск замерзания влаги в порах стеновых материалов, наиболее высокий на границе соприкосновения каменного основания с наружной штукатуркой;

- замерзание влаги в порах, трещинах и пустотах контактной зоны каменного основания и штукатурного покрытия может приводить к заземлению воды, возникновению значительных внутренних напряжений в штукатурном слое и, как следствие, к его постепенному повреждению, вплоть до выпадения отдельных фрагментов наружу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горшков А.С. Градостроительные эксперименты Петербурга // AlfaBuild. 2018. № 4 (6). С. 23–48. DOI: 10.34910/ALF.6.4. EDN FBDDQI.

2. Ицук М.К. Причины дефектов наружных стен с лицевым слоем из кирпичной кладки // Жилищное строительство. 2008. № 3. С. 28–31. EDN ISDXUR.

3. Лобов О.И., Ананьев А.И. Долговечность наружных стен современных многоэтажных зданий // Жилищное строительство. 2008. № 8. С. 48–54. EDN JTDKSKZ.

4. Деркач В.Н., Горшков А.С., Орлович Р.Б. Проблемы трещиностойкости стенового заполне-

- ния каркасных зданий из ячеисто-бетонных блоков // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-52-56. EDN TBACNL.
5. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Зимин С.С. Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 8 (43). С. 14–23. DOI: 10.5862/МСЕ.43.3. EDN RQAJQL.
6. Серикхалиев С.Б., Зимин С.С., Орлович Р.Б. Дефекты защитно-декоративной кирпичной облицовки фасадов каркасных зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 5 (20). С. 28–38. DOI: 10.18720/CUBS.20.3. EDN SEISBF.
7. Горшков Р.А., Райцева А.Р., Войлоков И.А. Системный анализ причин повреждения лицевого керамического кирпича // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 106–114. DOI: 10.46418/2619-0729_2022_2_19. EDN IZSAWJ.
8. Ефименко М.Н., Горшков Р.А. К вопросу об испытании пустотелых керамических кирпичей на прочность при изгибе // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2021. № 3. С. 11–15. DOI: 10.46418/2619-0729_2021_3_2. EDN NZILXJ.
9. Горшков А.С. Модель физического износа строительных конструкций // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 12 (191). С. 34–37. EDN TFCARV.
10. Зимин С.С., Горшков Р.А., Войлоков И.А., Корниенко С.В. Причины образования трещин в штукатурке неотапливаемых каменных зданий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1297–1306. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1297-1306
11. Старцев С.А., Харитонов А.М., Ступак М.В., Чиркин А.С. Оценка степени влияния капиллярного подсоса на увлажнение кирпичной кладки // Инновации и инвестиции. 2021. № 4. С. 293–297. EDN XPXXGD.
12. Далинчук В.С., Старцев С.А. Исследование влияния процессов конденсации и капиллярного подъема влаги в кирпичной кладке цокольной части исторических зданий // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 49–11. С. 29–34. DOI: 10.18411/lj-04-2019-225. EDN GBIUQC.
13. Гурьев В.В., Никитин В.И., Кофанов В.А. Влияние косого дождя на влагосодержание ограждающих конструкций из пористых силикатных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 15–21. EDN VZDPWD.
14. Улыбин А.В., Старцев С.А., Зубков С.В. Контроль влажности при обследовании каменных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 7 (42). С. 32–39. DOI: 10.5862/МСЕ.42.5. EDN RHAJJH.
15. Горшков А.С., Ливчак В.И. История, эволюция и развитие нормативных требований к ограждающим конструкциям // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3 (30). С. 7–37. EDN TUHVST.
16. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Пестряков И.И., Кнатько М.В. Прогнозирование эксплуатационного срока службы стеновой конструкции из газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 49–53. EDN NBIJUT.
17. Горшков А.С., Пестряков И.И., Корниенко С.В., Ватин Н.И., Ольшевский В.Я. Фактические теплотехнические характеристики ячеистых бетонов автоклавного твердения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 5 (68). С. 75–104. DOI: 10.18720/CUBS.68.7. EDN YLUYNF.
18. Горшков А.С. Оценка долговечности стеновой конструкции на основании лабораторных и натуральных испытаний // Строительные материалы. 2009. № 8. С. 12–17. EDN KUUCQL.
19. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Петриченко М.Р., Горшков А.С. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 6 (33). С. 19–33. EDN UQFYDB.
20. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка влажностного режима стен с фасадными теплоизоляционными композиционными системами // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 34–54. EDN WEFRDD.
21. Korniyenko S. Advanced hygrothermal performance of building component at reconstruction of S. Radonezhskiy temple in Volgograd // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 53. P. 01003. DOI: 10.1051/mateconf/20165301003
22. Корниенко С.В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 88–89. EDN HTCJ CZ.
23. Корниенко С.В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 132–145. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145
24. Sovetnikov D.O., Baranova D.V., Borodinecs A., Korniyenko S.V. Technical problems in churches in different climatic conditions // Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. No. 1 (64). Pp. 20–35. DOI: 10.18720/CUBS.64.2

Поступила в редакцию 17 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 9 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Ростислав Александрович Горшков — студент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП); 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А; РИНЦ ID: 1033779, ORCID: 0000-0002-0489-4107; rostalsgor@gmail.com;

Сергей Валерьевич Корниенко — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры зданий и сооружений, Институт архитектуры и строительства; Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 351367, Scopus: 56352359500, ResearcherID: G-1611-2018, ORCID: 0000-0002-5156-7352; svkorn2009@yandex.ru.

Вклад авторов:

Горшков Р.А. — идея, сбор материала, написание исходного текста, сбор и обработка данных, составление расчетной модели, развитие методологии.

Корниенко С.В. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gorshkov A.S. Urban planning experiments in St. Petersburg. *AlfaBuild*. 2018; 4(6):23-48. DOI: 10.34910/ALF.6.4. EDN FBDDQI. (rus.).
2. Ishchuk M.K. Causes of defects in exterior walls with a front layer of brickwork. *Housing Construction*. 2008; 3:28-31. EDN ISDXUR. (rus.).
3. Lobov O.I., Anan'ev A.I. Durability of exterior walls of modern multi-storey buildings. *Housing Construction*. 2008; 8:48-54. EDN JTDKSZ. (rus.).
4. Derkach V.N., Gorshkov A.S., Orlovich R.B. Problems of crack resistance of wall filling of frame buildings of cellular concrete blocks. *Construction Materials*. 2019; 3:52-56. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-52-56. EDN TBACNL. (rus.).
5. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Zimin Z.S. Application of stones of high voidage in the facing layer of the multilayer walls. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 8(43):14-23. DOI: 10.5862/MCE.43.3. EDN RQAJQL. (rus.).
6. Serikkhaliyev S.B., Zimin S.S., Orlovich R.B. The defects of protective facing masonry of frame buildings. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 5(20):28-38. DOI: 10.18720/CUBS.20.3. EDN SEISBF. (rus.).
7. Gorshkov R.A., Raitseva A.R., Voilokov I.A. System analysis of the causes of damage to the facing ceramic brick. Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. *Industrial Technologies*. 2022; 2:106-114. DOI: 10.46418/2619-0729_2022_2_19. EDN IZSAWJ. (rus.).
8. Efimenko M.N., Gorshkov R.A. Testing hollow ceramic bricks for bending strength. Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. *Industrial technologies*. 2021; 3:11-15. DOI: 10.46418/2619-0729_2021_3_2. EDN NZILXJ. (rus.).
9. Gorshkov A.S. Physical deterioration model of building structures. *Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2014; 12(191):34-37. EDN TFCARV. (rus.).
10. Zimin S.S., Gorshkov R.A., Voilokov I.A., Kornienko S.V. Causes of cracks in the plaster of unheated stone buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(10):1297-1306. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1297-1306 (rus.).
11. Startsev S.A., Kharitonov A.M., Stupak M.V., Chirkin A.S. Evaluation of the degree of influence of capillary suction on the moistening of brickwork. *Innovations and Investments*. 2021; 4:293-297. EDN XPXXGD. (rus.).
12. Dalinchuk V.S., Starcev S.A. Investigation of the influence of condensation processes and capillary rise of moisture in the brickwork of the basement of historical buildings. *Trends in the Development of Science and Education*. 2019; 49-11:29-34. DOI: 10.18411/lj-04-2019-225. EDN GBIUQC. (rus.).
13. Gur'ev V.V., Nikitin V.I., Kofanov V.A. The effect of oblique rain on the moisture content of enclosing structures made of silicate materials. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 5:15-21. EDN VZDPWD. (rus.).
14. Ulybin Av., Startsev S.A., Zubkov S.V. Humidity control in the inspection of masonry structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 7(42):32-39. DOI: 10.5862/MCE.42.5. EDN RHAJJH. (rus.).
15. Gorshkov A.S., Livchak V.I. History, evolution and development of regulatory requirements for enclosing structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 3(30):7-37. EDN TUHVST. (rus.).
16. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Pestryakov I.I., Knat'ko M.V. Forecasting the operational life of a wall structure made of aerated concrete with a silicate brick lining layer. *Construction Materials*. 2010; 9:49-53. EDN NBIUT. (rus.).

17. Gorshkov A.S., Pestryakov I.I., Korniyenko S.V., Vatin N.I., Olshevskiy V. Actual thermal insulation properties of cellular autoclave curing concretes. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 5(68):75-104. DOI: 10.18720/CUBS.68.7. EDN YLUYNF. (rus.).
18. Gorshkov A.S. Evaluation of the durability of the wall structure based on laboratory and field tests. *Construction Materials*. 2009; 8:12-17. EDN KUUCQL. (rus.).
19. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Petritchenko M.R., Gorshkov A.S. Evaluation of hygrothermal performance of multilayered wall design in annual cycle. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 6(33):19-33. EDN UQFYDB. (rus.).
20. Korniyenko S.K., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of moisture conditions of walls with facade's thermo-insulation composite. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45):34-54. EDN WEFRDD. (rus.).
21. Korniyenko S. Advanced hygrothermal performance of building component at reconstruction of S. Radonezhskiy temple in Volgograd. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 53:01003. DOI: 10.1051/matec-conf/20165301003
22. Korniyenko S.V. Humidity potential for determining the humidity state of exterior fencing materials in non-isothermal conditions. *Construction Materials*. 2006; 4:88-89. EDN HTCJCZ. (rus.).
23. Korniyenko S.V. Specification of Indoor Climate Design Parameters at the Assessment of Moisture Protective Properties of Enclosing Structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 11:132-145. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145 (rus.).
24. Sovetnikov D.O., Baranova D.V., Borodinecs A., Korniyenko S.V. Technical problems in churches in different climatic conditions. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 1(64):20-35. DOI: 10.18720/CUBS.64.2

Received January 17, 2023.

Adopted in revised form on April 9, 2024.

Approved for publication on April 9, 2024.

BIONOTES: **Rostislav A. Gorshkov** — student; **Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI)**; 67 Bolshaya Morskaya st., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation; ID RSCI: 1033779, ORCID: 0000-0002-0489-4107; rostalsgor@gmail.com;

Sergey V. Korniyenko — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Architecture of Buildings and Structures; Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RSCI: 351367, Scopus: 56352359500, ResearcherID: G-1611-2018, ORCID: 0000-0002-5156-7352; svkorn2009@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Rostislav A. Gorshkov — idea, collection of material, data gathering and processing, compilation of the calculation model, methodology.

Sergey V. Korniyenko — scientific guidance, conceptualization scientific editing of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Анализ прочностных и теплопроводных характеристик слоистых балок, состоящих из массива дерева и теплоизоляционного материала

Мария Сергеевна Панова¹, Николай Алексеевич Татусь^{1,2}

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

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Описывается экспериментально-теоретическая работа по исследованию характеристик слоистого строительного материала — термобруса, состоящего из массива дерева и слоев теплоизоляции. Подобные материалы применяются для строительства легковозводимых деревянных домов частного сектора и малоэтажных. Особенности такого типа материалов в том, что одновременно с конструкционным материалом — древесиной — брус содержит слой или слои утеплителя, что позволяет сократить этап утепления дома при его возведении. Прочная древесина и абсолютно ничего не способная нести теплоизоляция вместе могут дать материал, характеристики которого в корне отличаются как от первого, так и от второго.

Материалы и методы. Рассматривается влияние количества и толщины слоев теплоизоляции и древесины на прочностные и теплоизоляционные характеристики получаемого бруса. Зная закономерности изменения характеристик от количества слоев, становится возможным подобрать рациональную систему чередования слоев древесины и утеплителя. Проведены экспериментальные исследования балок с различным количеством и толщиной теплоизоляционных и силовых слоев; общая толщина и силовых, и теплоизоляционных слоев в каждой балке была одинаковой, но менялась последовательность их укладки.

Результаты. Показаны результаты экспериментального исследования прочности термобруса при изгибе и расчетное исследование его теплоизоляционных характеристик. Экспериментально получены зависимости максимальных нагрузок для балок с различным количеством слоев древесины/утеплителя.

Выводы. В результате проведенных экспериментов оказалось, что линейная теория изгиба не может точно описать поведение слоистого материала — выдерживаемая нагрузка росла с ростом количества слоев.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянный брус, термобрус, прочность, изгиб, балки, слоистые конструкции, теплоизоляция, испытания на изгиб, расчеты на прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Панова М.С., Татусь Н.А. Анализ прочностных и теплопроводных характеристик слоистых балок, состоящих из массива дерева и теплоизоляционного материала // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 982–990. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.982-990

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Татусь, nikalet@mail.ru.

Analysis of strength and thermal conductivity characteristics of layered beams consisting of solid wood and thermal insulation material

Maria S. Panova¹, Nikolay A. Tatus^{1,2}

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

² Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper describes experimental and theoretical work on the study of the characteristics of a layered building material — thermal timber, consisting of solid wood and layers of thermal insulation. Such materials are used for construction of lightly built wooden houses of private sector and low-rise houses. The peculiarities of this type of materials is that simultaneously with the construction material — wood beam contains a layer or layers of insulation, which allows to reduce the stage of insulation of the house during its construction. Strong wood and absolutely nothing capable of carrying insulation together can give a material whose characteristics are fundamentally different from both the first and the second.

Materials and methods. The influence of the number and thickness of layers of thermal insulation and wood on the strength and thermal insulation characteristics of the resulting timber is considered. Knowing the regularities of changing characteristics from the number of layers, it becomes possible to choose a rational system of alternation of wood and insulation layers. Experimental studies of beams with different number and thickness of thermal insulation and power layers were carried out, the total thickness of both power and thermal insulation layers in each beam were the same, but the sequence of laying was changed.

Results. The results of the experimental study of the bending strength of the thermal timber and the calculated study of its thermal insulation characteristics are shown. Dependences of maximum loads for beams with different number of wood/insulation layers were experimentally obtained.

Conclusions. As a result of the experiments it turned out that the linear bending theory cannot accurately describe the behaviour of the layered material — the withstand load grew with the increase in the number of layers.

KEYWORDS: wooden beams, thermal timber, strength, bending, beams, laminated structures, thermal insulation, bending tests, strength calculations

FOR CITATION: Panova M.S., Tatus N.A. Analysis of strength and thermal conductivity characteristics of layered beams consisting of solid wood and thermal insulation material. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):982-990. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.982-990 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Tatus, nikalet@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Термобрус — это современный строительный материал для малоэтажного строительства, который совмещает в себе высокие теплоизоляционные свойства современных изоляционных материалов и прочностные характеристики клееного бруса. Подобные конструкции называются сэндвичи [1–4], поскольку по краям располагается прочный материал, а в середине — легкий наполни-

тель, но есть оговорка. Сэндвичевые конструкции (как правило, это панели, а не балки) работают в плоскости листа, т.е. прочные слои — это верх и низ, однако принцип работы термобруса другой: силовые наружные слои работают в плоскостях, перпендикулярных плоскости листа (рис. 1) [5–10].

Термобрус производится с различными параметрами. Ламели бывают цельными или клееными (рис. 2), могут изготавливаться из хвойных пород древесины или лиственных [11–15]. Выбор тепло-

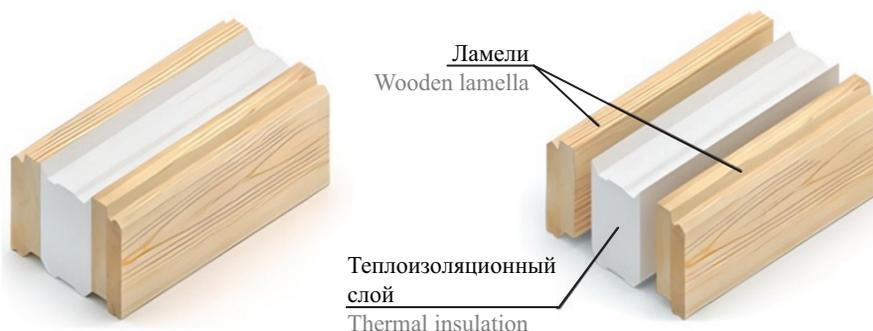


Рис. 1. Термобрус (общий вид)

Fig. 1. Thermal timber (general view)



Один теплоизоляционный
слой пенополиуретана
One layer of polyurethane foam



Один теплоизоляционный
слой каменной ваты
One layer of rockwool



Два теплоизоляционных слоя
экструдированного пенополистирола
Two layers of polystyrene foam

Рис. 2. Некоторые разновидности термобруса

Fig. 2. Some types of thermal timber

изоляционного материала (ТМ) обширен, но чаще всего применяются экструдированный пенополистирол (ППС) и пенополиуретан (ППУ), также можно использовать эковату или минеральную вату [16–21]. Вместо одного слоя ТМ может быть несколько слоев. Также существует пустотелый термобрус, у которого пространство между ламелями заполняется непосредственно в процессе строительства [22–25].

Цель исследования — изучение влияния количества и порядка расположения силовых и теплоизоляционных слоев на прочностные и теплоизоляционные [26, 27] характеристики термобруса. Для этого были подготовлены несколько образцов, проведены лабораторные испытания и аналитические исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов. Для проведения испытаний подготовлены 4 типа образцов (рис. 3), 3 из которых имели одинаковое количество массива дерева

b_t и теплоизоляции b_p , 4-й контрольный образец состоял только из массива дерева (табл. 1).

Расчет теплоизоляционных характеристик. Современные нормы строительства требуют, чтобы каждое здание обладало необходимым уровнем тепловой защиты, что возможно сделать, применяя высококачественные ТМ. Теплоизоляционные свойства материала зависят от теплопроводности, которая характеризуется коэффициентом λ .

Зная коэффициент теплопроводности, рассчитывают необходимую для соблюдения температурно-влажностного режима помещения толщину утеплителя. Для расчета тепло- и пароизоляционных свойств обычно используют СП 50.13330.2012, СНиП 23-02–2003 и СП 131.13330.2020, СНиП 23-01–99.

С целью анализа теплоизоляционных свойств термобруса проведено два расчета. Для задания условий, в которых находится строение из термобруса, взят г. Архангельск (влажная зона), внутри помещения был задан нормальный температурно-влажностный режим. Все ламели изготовлены

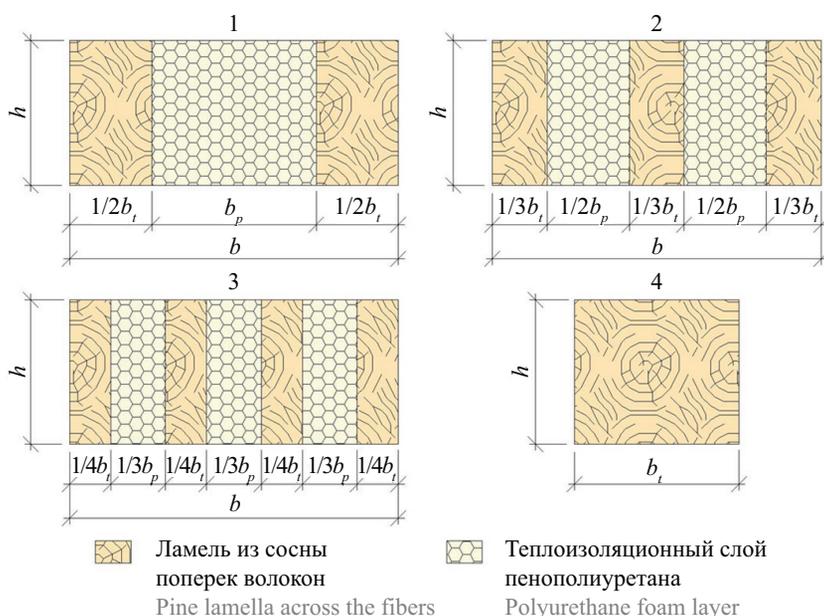


Рис. 3. Поперечное сечение лабораторных образцов для проведения испытаний

Fig. 3. Cross-section of laboratory test specimens

Табл. 1. Геометрические характеристики изготовленных образцов

Table 1. Geometric characteristics of the specimens

Номер образца Specimen No.	Ширина, 10^{-3} м Width, 10^{-3} m			h , 10^{-3} м / m	l , 10^{-3} м / m	W , 10^{-9} м ³ / m ³	
	b_t	b_p	b			Дерево Only wood	Общий Entire cross-section
1	29,0	29,0	58,0	24,2	150,00	2830,5	5661
2	28,25	28,25	56,50	24,0	150,00	2712	5424
3	28,75	28,75	57,50	24,2	150,00	2806	5612
4	25,30	–	25,30	23,9	150,00	2409	2409

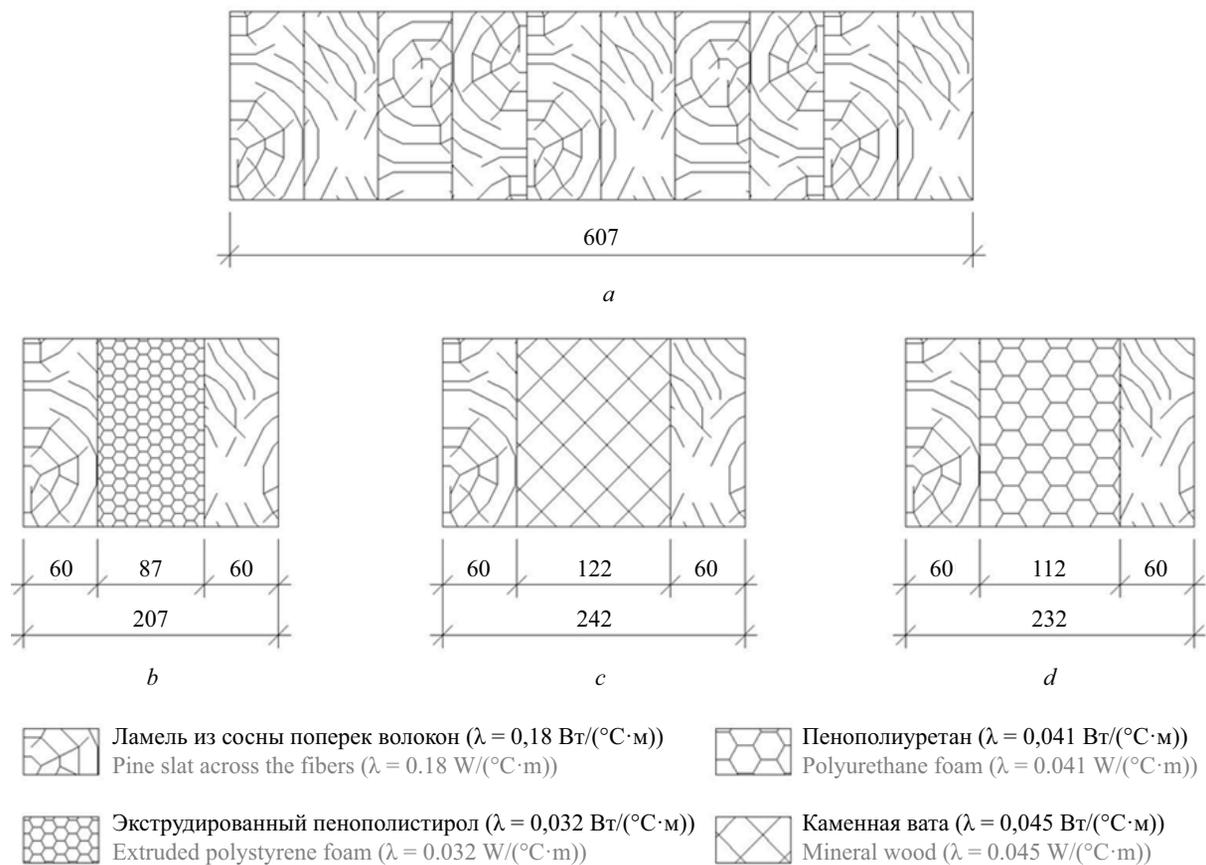


Рис. 4. Результаты теплотехнического расчета клееного бруса (a) и термобруса с разными теплоизоляционными материалами: b — экструдированный пенополистирол; c — каменная вата; d — пенополиуретан

Fig. 4. The results of thermal calculation of the glued timber (a) and the thermal timber made with different heat-insulating materials: b — extruded polystyrene foam; c — mineral wool; d — polyurethane foam

из сосны обыкновенной. Рассчитанное значение требуемого сопротивления теплопередаче термобруса составило $R_0^{\text{тп}} = 3,53 \text{ (°С}\cdot\text{м}^2/\text{Вт})$.

В первом расчете рассматривалось влияние необходимой для соблюдения эксплуатационных требований толщины различных видов применяемой теплоизоляции (экструдированный ППС, каменная вата и ППУ) на общую толщину термобруса. Результаты приведены на рис. 4. Из рис. 4 видно, что чем меньше коэффициент теплопроводности ТМ, тем меньшая толщина его нужна при соблюдении требований по утеплению здания.

Во втором расчете рассматривалось влияние разных вариантов «армирования» (чередование ламелей и утеплителя) термобруса на распределение температуры и парциального давления по его толщине. В качестве ТМ взят пенополиуретан. Результаты расчета приведены на рис. 5, где показаны кривые действительного e и максимального E парциального давления, которые пересекаются в каждом варианте, следовательно, выпадение конденсата возможно. В табл. 2 показано распределение значений t , E и e в сечении термобруса.

Определение прочностных характеристик термобруса. От механических характеристик стро-

ительного материала зависит стойкость строений к эксплуатационным нагрузкам, поэтому слои теплоизоляции не должны ни в коем случае снижать прочность термобруса. Для оценки прочностных характеристик термобруса проведены испытания по схеме поперечного изгиба (рис. 6).

Формула для определения предела прочности при поперечном изгибе имеет вид:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{W} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2},$$

где M — максимальный изгибающий момент; W — момент сопротивления сечения; P — разрушающая сила при изгибе; l — пролет (длина) балки; b — ширина поперечного сечения; h — высота поперечного сечения.

Предел прочности зависит от геометрии сечения балки, основную нагрузку в термобрусе будут воспринимать деревянные ламели, поскольку прочностные характеристики ТМ очень малы. К примеру, прочность на изгиб у экструдированного ППС составляет 0,4–1 МПа, у сосны — порядка 78 МПа. Поэтому при расчете максимальных напряжений следует учитывать только поперечное сечение массива дерева. Результаты представлены в табл. 3.

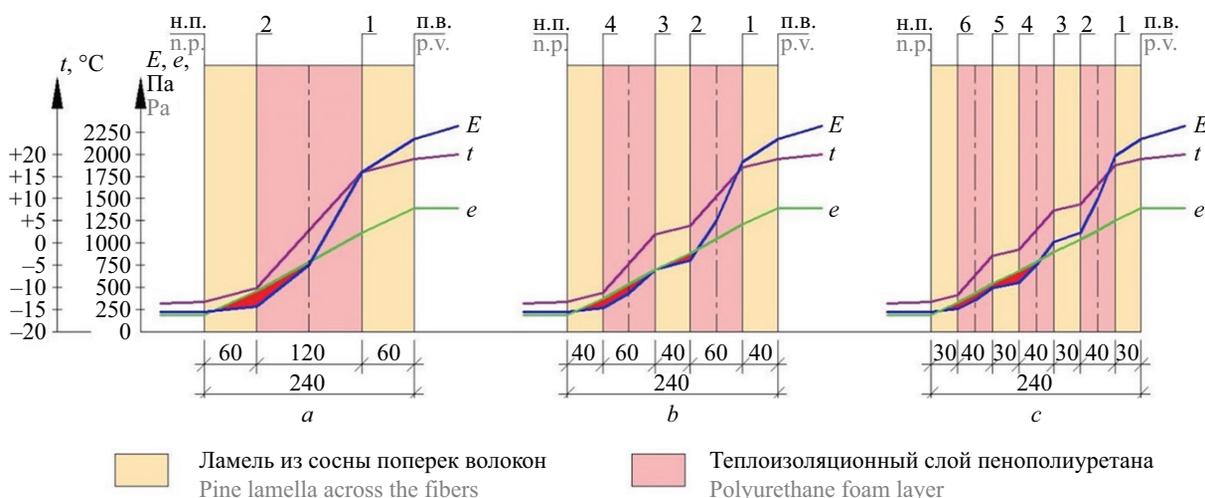


Рис. 5. Графики распределения температуры t и парциального давления водяного пара E и e по толще термобруса с разными вариантами чередования слоев

Fig. 5. Temperature t and water vapour partial pressure E и e distribution diagrams of the thermal timber with different options of layer alternation

Табл. 2. Распределение значений t , E и e в сечении термобруса

Table 2. The distribution of t , E и e values in the thermal timber

Сечение Location of section	Вариант a Option a			Вариант b Option b			Вариант c Option c		
	t , °C	E , Па / Па	e , Па / Па	t , °C	E , Па / Па	e , Па / Па	t , °C	E , Па / Па	e , Па / Па
Внутренний воздух Inner air	20	2315	1389	20	2315	1389	20	2315	1389
Внутренняя поверхность Inner surface	18,97	2171,2	1389	18,97	2171,2	1389	18,97	2171,2	1389
1	15,99	1797,7	1115,7	16,98	1913,6	1206,8	17,48	1976,2	1252,4
2	-10,24	285,2	460,0	3,87	802,3	878,9	8,74	1118,7	1033,7
3	-	-	-	1,88	698,0	696,7	7,24	1012,0	897,1
4	-	-	-	-11,24	264,0	368,7	-1,5	548,3	678,4
5	-	-	-	-	-	-	-3,0	491,3	541,8
6	-	-	-	-	-	-	-11,74	253,9	323,2
Наружная поверхность Outer surface	-13,23	226,0	186,5	-13,23	226,0	186,5	-13,23	226,0	186,5
Наружный воздух Outer air	-13,6	219,4	186,5	-13,6	219,4	186,5	-13,6	219,4	186,5

РЕЗУЛЬТАТЫ

На графиках распределения температур и парциального давления водяного пара по толще термобруса кривые действительного и максимально-го парциального давления пересекаются в каждом варианте, следовательно, выпадение конденсата возможно. В первом варианте присутствует 1 участок пересечения, во втором и третьем вариантах — по 2 участка пересечения. Это можно объяснить малым значением коэффициентов паропроницаемости

как дерева поперек волокон, так и ППУ. Можно заметить, что чем больше чередований ламель — утеплитель, тем меньше площадь участка, на котором может выпасть конденсат.

Испытания на изгиб показали интересный результат: максимальная нагрузка, а следовательно, и максимальные напряжения растут с увеличением количества слоев, но напряжения при изгибе зависят от ширины образца линейно и не должны меняться из-за порядка расположения слоев в термобрусе.

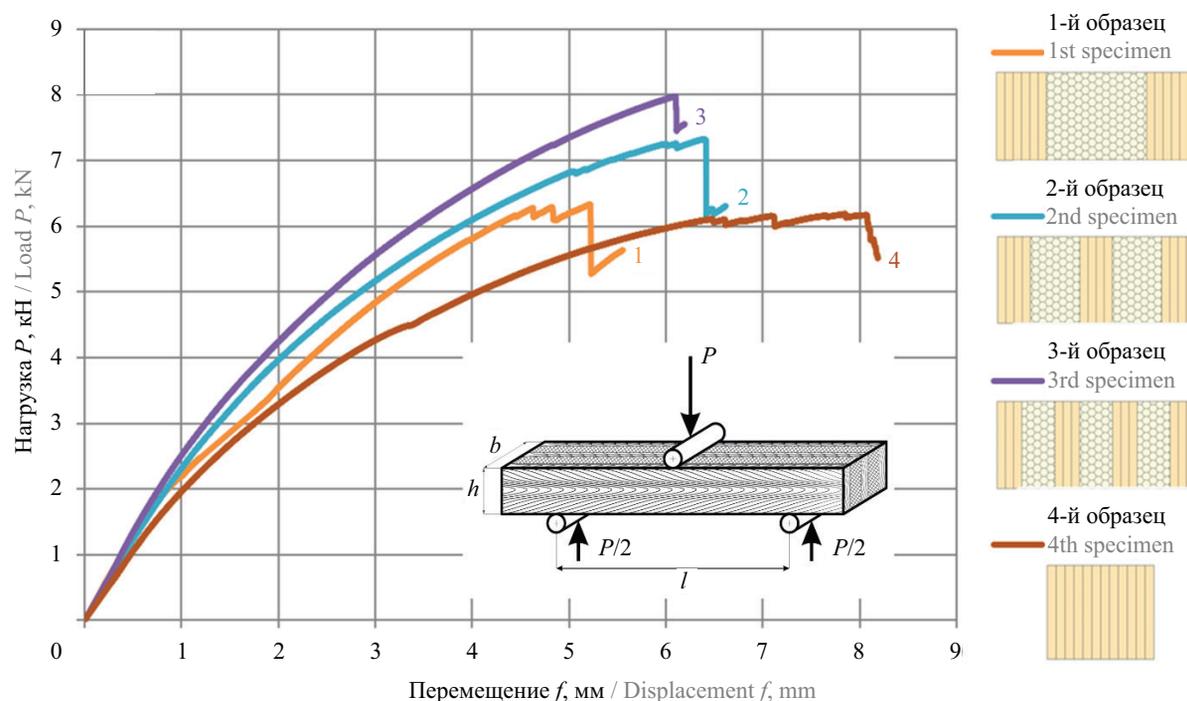


Рис. 6. Результаты эксперимента и схема проведения испытаний на поперечный изгиб

Fig. 6. Experimental results and scheme of cross-bending tests

Табл. 3. Максимальные напряжения при изгибе

Table 3. Maximum bending stresses

Номер образца Specimen No.	P_{\max} , кН / kN	f_{\max} , мм / mm	σ_{\max} , МПа / MPa
1	6,332	5,22	39,1
2	7,324	6,39	47,3
3	7,976	6,12	49,7
4	6,186	7,86	89,9

Авторы считают, что увеличение максимальной силы связано с более равномерным распределением нагрузки по ширине сечения при увеличении количества деревянных ламелей, т.е. в первом случае ламелей 2, во втором — 3, в третьем — 4, в четвертом — сплошной брус, площадь поперечного сечения которого примерно равна площади древесины в термобрусе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения степени теплоизоляции следует изготавливать термобрус с применением пористых материалов, таких как экструдированный пенополистирол и пенополиуретан.

Для большей несущей способности необходимо изготавливать термобрус с применением большего количества слоев.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Mohamed N.A.N. Sandwich structure based on corrugated-core : a review // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 74. P. 00029. DOI: 10.1051/mateconf/20167400029

2. Комаров В.А., Павлова С.А. Учет требований жесткости при проектировании трехслойных конструкций панелей пола самолета из высокопрочных композиционных материалов // Вестник Самарского

университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 2. С. 45–52. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-45-52. EDN SUXWWR.

3. Stefan A., Pelin G., Pelin C., Petre A., Marin M. Manufacturing process, mechanical behavior and modeling of composites structures sandwich panel // Incas Bulletin. 2021. Vol. 13. Issue 1. Pp. 183–191. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.1.19

4. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные строительные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76–87. EDN TJASQP.
5. American Institute of Timber Construction. Timber construction manual. 2012. DOI: 10.1002/9781118279687
6. Hayward P.A. Timber-connector construction // Journal of Fluids Engineering. 1937. Vol. 59. Issue 5. Pp. 457–460. DOI: 10.1115/1.4020487
7. Bader T., Ormarsson S. Modeling the mechanical behavior of wood materials and timber structures // Springer Handbook of Wood Science and Technology. 2023. Pp. 507–568. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4_10
8. Kuzman M., Oblak L., Vratuša S. Glued laminated timber in architecture // Drvna Industrija. 2010. Vol. 61. Issue 3.
9. Gao S., Xu M., Guo N., Zhang Y. Mechanical properties of glued-laminated timber with different assembly patterns // Advances in Civil Engineering. 2019. Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2019/9495705
10. Хошимова Ф.Ф., Панфилов Д.В., Поликутин А.Э. Расчет деревянных мостовых брусев, армированных лентой из углеродного волокна, при циклических воздействиях // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 3 (71). С. 22–30. DOI: 10.36622/VSTU.2023.3.71.002. EDN JOWSQH.
11. Kopecky P., Staněk K., Bureš M., Richter J., Tywoniak J. Experimental investigations of wooden beam ends in masonry with internal insulation // Energy Procedia. 2017. Vol. 132. Pp. 682–687. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.006
12. Vereecken E., Roels S. Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport // Building and Environment. 2019. Vol. 148. Pp. 524–534. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.060
13. Mets T., Tilmans A. Evaluation of the risk of decay of wooden beams embedded in internally insulated walls by long-term measurements // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 172. P. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017201002
14. Micháľková D., Ďurica P. Experimental verification of thermal insulation in timber framed walls // Materials. 2022. Vol. 15. P. 2040. DOI: 10.3390/ma15062040
15. Абу-Хасан М.С., Розанцева Н.В., Егоров В.В., Куправа Л.П. Оптимизация конфигурации перекрестно-балочной системы пространственной конструкции в зависимости от заданных параметров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 9 (1033). С. 32–35. EDN UJGVIE.
16. Bozsaky D. The historical development of thermal insulation materials // Periodica Polytechnica Architecture. 2011. Vol. 41. Issue 2. Pp. 49–56. DOI: 10.3311/pp.ar.2010-2.02
17. Aksit M., Zhao C., Klose B., Kreger K., Schmidt H., Altstädt V. Extruded polystyrene foams with enhanced insulation and mechanical properties by a benzene-trisamide-based additive // Polymers. 2019. Vol. 11. Issue 2. P. 268. DOI: 10.3390/polym11020268
18. Mahajan U.R., Emmanuel I., Sreenivasarao A., Mhaske S.T. Development of smart polyurethane foam with combined capabilities of thermal insulation and thermal energy storage by integrating microencapsulated phase change material // Polymer Bulletin. 2023. Vol. 80. Issue 12. Pp. 13099–13115. DOI: 10.1007/s00289-023-04695-8
19. Samardzioska T., Jovanoska M. Recycled rebonded polyurethane foam as sustainable thermal insulation. 2023. DOI: 10.33552/CTCSE.2023.09.000719
20. Rapley S., Bompa D., Biswal S. Compression resistance of digitally fabricated hollow timber columns // Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 Integration of Design and Fabrication. 2023.
21. Неверов Е.Н., Короткий И.А., Коротких П.С., Расценкин А.Н., Самар С.А. Изучение процесса деформации различных видов теплоизоляционных материалов при воздействии низких температур и влаги // Вестник МГСУ. 2023. № 18 (8). С. 1251–1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1251-1261
22. Suthesh M., Chollackal A. Thermal performance of multilayer insulation : a review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 396. P. 012061. DOI: 10.1088/1757-899X/396/1/012061
23. Perković N., Rajčić V. Mechanical and fire performance of innovative hollow glue-laminated timber beams // Polymers. 2022. Vol. 14. Issue 16. P. 3381. DOI: 10.3390/polym14163381
24. Zöllig S., Frangi A., Franke S., Muster M. Timber structures 3.0 — new technology for multi-axial, slim, high performance timber structures // World Conference on Timber Engineering. 2016.
25. Liu Y. Study on the influence of the arrangement of thermal insulation floor on the thermal insulation and mechanical properties of hollow slab // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 125–136. DOI: 10.1007/978-981-99-1748-8_10
26. Caniato M., Marzi A., da Silva S., Gasparella A. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. P. 103066. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103066
27. Колесова А.В. Сравнительная характеристика теплотехнических свойств строительных материалов, использующихся во внешних ограждениях // Наукосфера. 2023. № 1–1. С. 322–325. EDN TKOMUK.

Поступила в редакцию 26 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 9 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Мария Сергеевна Панова** — магистр кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1233566; panova.mariya1999@gmail.com;

Николай Алексеевич Татусь — кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией безопасности и прочности композитных конструкций; **Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)**; 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4; РИНЦ ID: 157336, Scopus: 12039478400, ResearcherID: AAI-2387-2020, ORCID: 0000-0003-1748-9976; nikalet@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Mohamed N.A.N. Sandwich structure based on corrugated-core : a review. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 74:00029. DOI: 10.1051/mateconf/20167400029
2. Komarov V.A., Pavlova S.A. Optimal design of sandwich floor panels made of high-strength composite materials considering stiffness constraints. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021; 20(2):45-52. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-45-52. EDN SUXWWR. (rus.)
3. Stefan A., Pelin G., Pelin C., Petre A., Marin M. Manufacturing process, mechanical behavior and modeling of composites structures sandwich panel. *Incas Bulletin*. 2021; 13(1):183-191. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.1.19
4. Pavlycheva E.A., Pikalov E.S. Modern energy-efficient structural and facing building materials. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2020; 7:76-87. EDN TJASPO. (rus.)
5. American Institute of Timber Construction. *Timber construction manual*. 2012. DOI: 10.1002/9781118279687
6. Hayward P.A. Timber-connector construction. *Journal of Fluids Engineering*. 1937; 59(5):457-460. DOI: 10.1115/1.4020487
7. Bader T., Ormarsson S. Modeling the mechanical behavior of wood materials and timber structures. *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. 2023; 507-568. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4_10
8. Kuzman M., Oblak L., Vratuša S. Glued laminated timber in architecture. *Drvna Industrija*. 2010; 61(3).
9. Gao S., Xu M., Guo N., Zhang Y. Mechanical properties of glued-laminated timber with different assembly patterns. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 1-13. DOI: 10.1155/2019/9495705
10. Khoshimova F.F., Panfilov D.V., Polikutin A.E. Calculation of wooden bridge beams, reinforced with carbon fiber tape, with cyclic effects. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 3(71):22-30. DOI: 10.36622/VSTU.2023.3.71.002. EDN JOWSQH. (rus.)
11. Kopecky P., Staněk K., Bureš M., Richter J., Tywoniak J. Experimental investigations of wooden beam ends in masonry with internal insulation. *Energy Procedia*. 2017; 132:682-687. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.006
12. Vereecken E., Roels S. Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport. *Building and Environment*. 2019; 148:524-534. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.060
13. Mets T., Tilmans A. Evaluation of the risk of decay of wooden beams embedded in internally insulated walls by long-term measurements. *E3S Web of Conferences*. 2020; 172:01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017201002
14. Micháľková D., Ďurica P. Experimental verification of thermal insulation in timber framed walls. *Materials*. 2022; 15:2040. DOI: 10.3390/ma15062040
15. Abu-Hasan M.S., Rozanceva N.V., Egorov V.V., Kuprava L.R. Optimization of configuration of cross-beam system of spatial structure depending on the given parameters. *BCT: Bulletin of Construction Technology*. 2020; 9(1033):32-35. EDN UJGVIE. (rus.)
16. Bozsaky D. The historical development of thermal insulation materials. *Periodica Polytechnica Architecture*. 2011; 41(2):49-56. DOI: 10.3311/pp.ar.2010-2.02
17. Aksit M., Zhao C., Klose B., Kreger K., Schmidt H., Altstädt V. Extruded polystyrene foams with enhanced insulation and mechanical properties by a benzene-trisamide-based additive. *Polymers*. 2019; 11(2):268. DOI: 10.3390/polym11020268
18. Mahajan U.R., Emmanuel I., Sreenivasarao A., Mhaske S.T. Development of smart polyurethane foam with combined capabilities of thermal

insulation and thermal energy storage by integrating microencapsulated phase change material. *Polymer Bulletin*. 2023; 80(12):13099-13115. DOI: 10.1007/s00289-023-04695-8

19. Samardzioska T., Jovanoska M. *Recycled rebonded polyurethane foam as sustainable thermal insulation*. 2023. DOI: 10.33552/CTCSE.2023.09.000719

20. Rapley S., Bompa D., Biswal S. Compression resistance of digitally fabricated hollow timber columns. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 Integration of Design and Fabrication*. 2023.

21. Neverov E.N., Korotkiy I.A., Korotkih P.S., Rasshchepkin A.N., Samar S.A. Study of the deformation process of various types of thermal insulation materials under the influence of low temperatures and moisture. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(8):1251-1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1251-1261 (rus.).

22. Sutheesh M., Chollackal A. Thermal performance of multilayer insulation : a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 396:012061. DOI: 10.1088/1757-899X/396/1/012061

23. Perković N., Rajcic V. Mechanical and fire performance of innovative hollow glue-laminated timber beams. *Polymers*. 2022; 14(16):3381. DOI: 10.3390/polym14163381

24. Zöllig S., Frangi A., Franke S., Muster M. Timber Structures 3.0 — New Technology for Multi-axial, Slim, High Performance Timber Structures. *World Conference on Timber Engineering*. 2016.

25. Liu Y. Study on the influence of the arrangement of thermal insulation floor on the thermal insulation and mechanical properties of hollow slab. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 125-136. DOI: 10.1007/978-981-99-1748-8_10

26. Caniato M., Marzi A., da Silva S., Gasparella A. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43:103066. DOI: 10.1016/j.job.2021.103066

27. Kolesova A.V. Comparative characteristics of thermal properties of building materials, used in external fences. *Naukosfera*. 2023; 1-1:322-325. EDN TKOMUK. (rus.).

Received September 26, 2023.

Adopted in revised form on February 9, 2024.

Approved for publication on February 9, 2024.

B I O N O T E S : **Maria S. Panova** — master of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1233566; panova.mariya1999@gmail.com;

Nikolay A. Tatus — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Laboratory of Safety and Strength of Composite Structures; **Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS)**; 4 Maly Kharitonevsky pereulok, Moscow, 101000, Russian Federation; ID RSCI: 157336, Scopus: 12039478400, ResearcherID: AAI-2387-2020, ORCID: 0000-0003-1748-9976; nikalet@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.19:624.13

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.991-1005

Аналитическое определение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при проходке

Армен Заветович Тер-Мартirosян, Виктория Владимировна Рудь

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из эффективных подходов к оценке влияния от тоннелепроходческих работ является комплексный подход к решению задач, включающий определение давления пригруза для обеспечения устойчивости забоя и оценку дополнительных перемещений дневной поверхности, возникающих в процессе строительства тоннелей. Данный подход обоснован тем, что фактические перемещения могут быть близки к прогнозируемым при условии подбора оптимального давления пригруза и отсутствия лобового перебора, который может привести к непредвиденным деформациям. Однако следует отметить, что методика расчета давления пригруза, представленная в современном стандарте, служит предварительным прогнозом и требует постоянной корректировки давления во время выполнения тоннелепроходческих работ.

Материалы и методы. Адаптирована постановка задачи Мелана с горизонтальной нагрузкой, параллельной поверхности, для оценки изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива перед забоем тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК) от приложения грунтопригруза. Постановка задачи соответствует этапу производства работ перед выемкой грунта для установки сборного железобетонного кольца обделки в проектное положение.

Результаты. По сформированным аналитическим уравнениям в программной среде MathCAD составлены изополя вертикальных, горизонтальных напряжений и вертикальных деформаций. Проведено сопоставление полученных изополей с изополями, которые были построены в ПК Plaxis 2D с аналогичными параметрами для проверки достоверности результатов. Дополнительно получены изополя грунтового массива при действии на него давления пригруза с учетом напряжений от собственного веса грунта с целью создания более правдоподобного НДС массива, в котором прокладывается перегонный тоннель.

Выводы. Анализ результатов исследования показал, что изополя количественно и качественно схожи между собой. Предложенный метод при соответствующей модификации можно адаптировать для корректировки давления пригруза в ходе строительства, что необходимо как для обеспечения устойчивости забоя в ходе строительства тоннеля, так и для минимизации влияния на поверхность грунта от пригруза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТПМК, тоннель, деформации дневной поверхности, давление пригруза, устойчивость забоя, НДС грунтового массива, решение Мелана

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Рудь В.В. Аналитическое определение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при проходке // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 991–1005. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.991-1005

Автор, ответственный за переписку: Виктория Владимировна Рудь, victoriadll@yandex.ru.

Analytical determination of the stress-strain state of soil mass during tunnelling

Armen Z. Ter-Martirosyan, Victoria V. Rud

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

ABSTRACT

Introduction. One of the effective approaches to assessing the impact of tunnel construction works involves a comprehensive approach to problem-solving, including determination of the face-support pressure to ensure the stability of the tunnel face and assessment of additional surface movements that occur during tunnel construction. This approach is justified by the fact that actual displacements can be close to predicted ones when the optimal face-support pressure is selected and there is no face loss of soil, which could lead to unforeseen deformations. However, it should be noted that the method for calculating pressure presented in the current standard is a preliminary forecast and requires constant adjustment of the pressure during tunnel construction works.

Materials and methods. In this work, the authors adapted Melan's problem formulation with a horizontal load parallel to the surface to assess the change in the stress-strain state of the soil mass before tunnel face excavation due to the application of the face-support pressure. The problem formulation corresponds to the stage of work preparation before excavation of the soil for the installation of a precast concrete lining ring into its design position.

Results. Based on the analytical equations formulated in the MathCAD software environment, isopoles of vertical and horizontal stresses, and vertical deformations were created. The obtained isopoles were compared with isopoles generated in the Plaxis 2D software using similar parameters to validate the results. Additionally, isopoles of the soil mass under the influence of the face-support pressure, considering self-weight stresses, were obtained to establish a more realistic stress-strain state of the mass in which a tunnel is being constructed.

Conclusions. The analysis of the research results has shown that the isopoles are quantitatively and qualitatively similar to each other. The method proposed by the authors can be adapted with appropriate modifications to adjust the face-support pressure during construction, which is necessary both to ensure the stability of the tunnel face during construction and to minimize the impact of the face-support pressure on the ground surface.

KEYWORDS: TBM, tunnel, surface deformation, face-support pressure, face stability, SSS of the soil mass, Melan's solution

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Rud V.V. Analytical determination of the stress-strain state of soil mass during tunnelling. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):991-1005. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.991-1005 (rus.).

Corresponding author: Victoria V. Rud, victoriadll@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство тоннелей закрытым способом, даже с применением современного оборудования, вызывает изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива, оседание поверхности земли, а также объектов, которые находятся в этом массиве [1]. Строительство метрополитена зачастую осуществляется в условиях застройки с высокой плотностью и развитым подземным пространством, которое включает подземные части зданий, инженерные коммуникации, технические сооружения, транспортные системы и т.д.

Оптимальный подход к решению задачи оценки влияния на окружающую застройку был сформирован в работе А.Г. Протосени и соавт. [2], в которой предложена методика расчета давления пригруза, основанная на теории предельного равновесия [3], а также методика определения осадки дневной поверхности с учетом дополнительно извлекаемого грунта из забоя («потерянного объема грунта» или коэффициент перебора) и функции нормального распределения Гаусса. По итогам исследования авторы связывают деформации поверхности грунта и давление пригруза, которое может обеспечить устойчивость забоя или минимизировать влияние от строительства при определенном соотношении величины давления пригруза и глубины залегания тоннеля.

Авторы настоящей статьи также неоднократно упоминали в своих публикациях [4, 5] прямую связь между технологическим параметром проходки, давлением пригруза и дополнительными деформациями объектов, попавших в зону влияния строительства тоннелей. При исследовании конкретной ситуации, в которой с помощью увеличения давления пригруза на 0,5–1,1 бар минимизировано дальнейшее развитие вертикальных дополнительных перемещений здания на один цикл геотехнического мониторинга [4], был сделан вывод о корреляционной и каузальной связи между параметрами.

Далее в труде [5] были предложены величины коэффициентов перебора, полученные при обратном пересчете на основании данных геотехнического мониторинга в плоской постановке, которые можно использовать при условии оптимального подбора величины давления пригруза для обеспечения устойчивости забоя. Другими словами, задача оценки влияния требует комплексного подхода к решению. Таким образом, определение давления пригруза является ключевой задачей в рамках обеспечения безостановочной прокладки тоннелей в любых условиях и безопасности производства работ.

Установление величины давления пригруза следует из условия обеспечения устойчивости забоя, которое можно определить с помощью экспериментального, численного и аналитического подходов.

Одна из первых работ [6] в этом направлении была представлена в 1961 г. Ее идея заключалась в методе предельного равновесия, который подразумевает обрушение массива грунта на предполагаемой плоской поверхности разрушения. Этот метод базируется на теории силоса (silo theory) [7], предложенной в 1895 г. Теория силоса основана на представлении грунта как сосредоточенного массива, подобного зерновому силосу, отсюда и название. Она предполагает, что горизонтальные нагрузки на грунт вызывают распределение напряжений внутри него, а также деформации, подобные сжатию. Эти деформации равномерно распределяются под уровнем нагрузки и затухают с увеличением глубины.

Данное явление было отмечено ранее и другим ученым М. Фридом, который в своем труде представил экспериментальные результаты [8]. В его работе доказано, что происходит передача части веса зерна на стенки емкости благодаря действию сил, включающих распор и трение. По мнению ученого, давление на стенки служит постоянной величиной и не зависит от расстояния между поверхностью и верхней отметкой зернового массива. Давление на дно сосуда значительно меньше веса зернового столба.

Последующая разработка метода была проведена Г. Анагносту и К. Ковари [9], которые исследовали механизм разрушения забоя в дренированных условиях. Стабильность забоя тоннеля обеспечивается взаимодействием давления воды и эффективного давления в камере. Давление воды в камере уменьшает гидравлический градиент в грунте и, следовательно, силы просачивания, действующей перед забоем. Таким образом, забой стабилизируется как напрямую поддерживаемым грунтом под давлением, так и за счет снижения просачивающихся сил в грунт. Чем больше разница в напорах между грунтом и камерой, тем выше должно быть эффективное опорное давление, и наоборот. Однако высокое давление пригруза сопровождается эксплуатационными недостатками, такими как износ резца, высокий крутящий момент и т.д.

В 1908 г. ученый М.М. Протоdjяконов представил свою работу [3] по определению горного давления с использованием теории предельного равновесия, в которой подробно описал сводообразование над горной крепью.

В соответствии с гипотезой М.М. Протоdjяконова [3], при строительстве выработки породы, находящаяся на кровле, оказывает давление на выработку своим весом внутри свода давления, который имеет высоту h и ширину $2b_1$ (рис. 1). В случае разрушения породы над кровлей образуется свод и наклонные плоскости в боках, которые используются для расчета. Расчетный пролет свода давления определяется на основе теории сыпучего тела, принимая угол наклона плоскостей обрушения к вертикали равным $45 - \varphi/2$ градусов (φ — угол внутреннего трения грунта).

Г. Анагносту [10] позднее рассматривал проблему устойчивости забоя с акцентом на влияние горизонтальных напряжений, которые должны учитываться при сопротивлении сдвигу и равновесии нестабильного массива грунта перед забоем. В соответствии с теорией силоса, горизонтальные напряжения могут быть определены путем уста-

новления постоянного процента от вертикальных напряжений. С данной гипотезой автор исследовал влияние арочного эффекта (сводообразования) на устойчивость забоя.

Исследования [10] показали, что арочный эффект и влияние сопротивления боковому сдвигу более выражены при узком поперечном сечении выработки (при $B/H = 0,5$, где B — ширина поперечной выработки; H — высота). Проиллюстрирована полученная закономерность для тоннелей глубиной залегания $h \geq D$ (D — диаметр тоннеля): чем уже выработка, тем ниже необходимо опорное давление для поддержания устойчивости забоя.

Автор дополнительно обращает внимание на влияние глубины залегания тоннеля h на величину давления пригруза s . В грунтах с высоким углом трения ($\varphi = 25-35^\circ$) при $h = H$ опорное давление s уже достигает максимальной величины и далее почти не изменяется. При $\varphi = 15-24^\circ$ величина опорного давления s возрастает по мере увеличения глубины залегания тоннеля h .

Е. Лека и Л. Дормье [11] построили трехмерную конусообразную модель нарушения устойчивости забоя для тоннеля в песчаном грунте на основе метода анализа пластичности по верхней границе. В указанной работе выполнен анализ механизма потери устойчивости забоя, а также выпора поверхности, также известного как пассивное разрушение, которое является следствием завышенного давления пригруза.

Метод численного моделирования также получил широкое распространение при решении задачи устойчивости забоя. В одном из численных исследований [12] авторы изучают влияние фильтрационной силы на давление пригруза. Для решения задачи численным методом они учитывают эффективное напряжение грунта и используют метод стохастического численного предельного анализа, позволяющий рассчитать поровое давление. Результаты исследования показали, что неоднородность коэффициента фильтрации приводит к увеличению

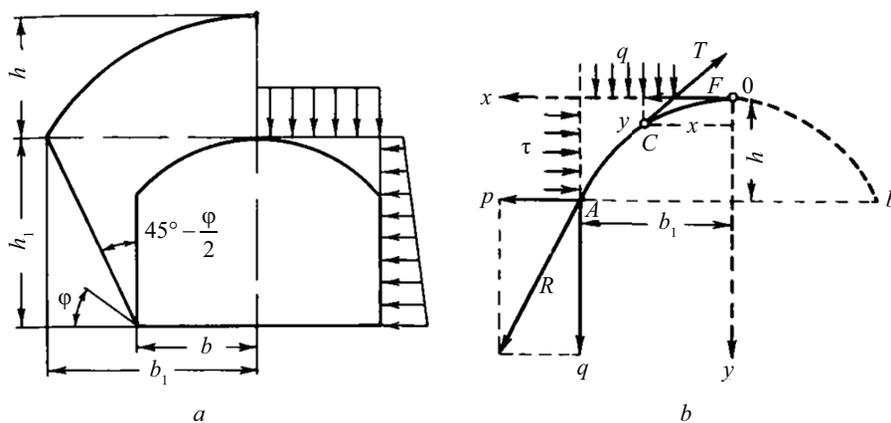


Рис. 1. Схема давления породы по М.М. Протоdjяконову [3]

Fig. 1. Scheme of rock pressure according to M.M. Protodyakonov [3]

градиента порового давления на забое. Увеличение разницы вертикального коэффициента фильтрации к горизонтальному коэффициенту влияет на увеличение давления пригруза, необходимого для поддержания устойчивости забоя.

В другом исследовании [13] оценивается влияние прочностных характеристик грунта, а также диаметр поперечного сечения тоннеля на увеличение диапазона деформаций грунтового массива. В исследовании показано, что тоннель диаметром $D = 6$ м приведет к более значительному диапазону деформаций, в отличие от тоннеля диаметром $D = 4$ м. Однако по мере увеличения сцепления образуются более узкая зона деформаций, а по мере увеличения угла внутреннего трения зона становится не только уже, но и короче. Можно сделать вывод, что с помощью оптимизации поперечного сечения тоннеля, т.е. ее минимизации, в менее прочных грунтах возможно обеспечить устойчивость забоя конструктивным способом.

В другой публикации [14] рассмотрено влияние на опорное давление и область деформаций прочностных свойств массива, в котором находится тоннель, а также наличие нескольких пластов грунта в забое. Результаты показали, что увеличение сцепления и угла внутреннего трения положительно влияет на устойчивость забоя, однако удельный вес грунта обладает противоположным влиянием на устойчивость. Наличие слоя грунта с более худшими параметрами (слабый слой) повышает величину давления пригруза, необходимого для поддержания устойчивости, по мере его сдвижения вниз относительно выработки. Дополнительно отмечено, что наличие верхнего слабого слоя над прочным слоем грунта более благоприятный случай для устойчивости забоя, чем наличие верхнего прочного грунта над слабым.

В текущих стандартах, а именно в СТО НОСТРОЙ 2.27.19–2011, описан метод определения давления пригруза забоя. Этот метод использует основные принципы определения горного давления по теории предельного равновесия, которую предложил М.М. Протодьяконов. Однако стоит отметить, что в данном стандарте указывается на высокую степень неопределенности инженерно-геологических и гидрогеологических условий строительства тоннелей на этапе проектных изысканий. По этой причине предложенную методику расчета следует рассматривать как предварительный прогноз, который требует постоянной корректировки во время выполнения тоннелепроходческих работ.

Таким образом, авторы предлагают рассмотреть задачу Э. Мелана, основанную на решениях теории упругости, которую можно адаптировать для подбора величины давления пригруза, необходимого для поддержания стабильности забоя. Ранее данная задача применялась для других целей, о которых указано далее.

Исследование напряжений, происходящих внутри массива под воздействием единичной силы, было проведено Э. Меланом и опубликовано в 1932 г. В его работе рассматривается полупространство, ограниченное с одной стороны по прямой $x = 0$, а с другой стороны простирающееся до бесконечности [15].

На рис. 2 представлены схемы для определения НДС при разных приложениях сосредоточенной нагрузки относительно системы координат на границе полупространства.

Точка приложения сосредоточенной нагрузки имеет координаты $x = a$ и $y = 0$, нагрузка раскладывается на две составляющие, параллельные осям координат, и имеет положительный знак, если они движутся в отрицательном направлении к этим осям [15].

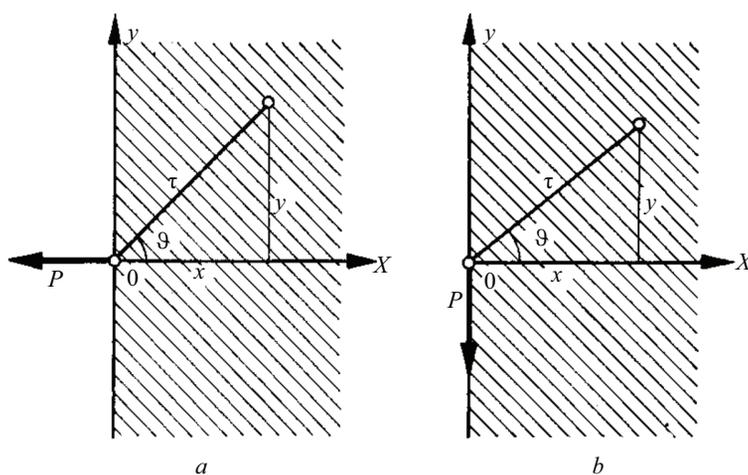


Рис. 2. Схема определения НДС при сосредоточенной нагрузке P на границе полупространства, действующей перпендикулярно (а) и параллельно (б) ограниченному краю полупространства [15]

Fig. 2. Scheme for determining the stress-strain state under concentrated load P on the boundary of the half-space, acting perpendicular (a) and parallel (b) to the restricted edge of the half-space [15]

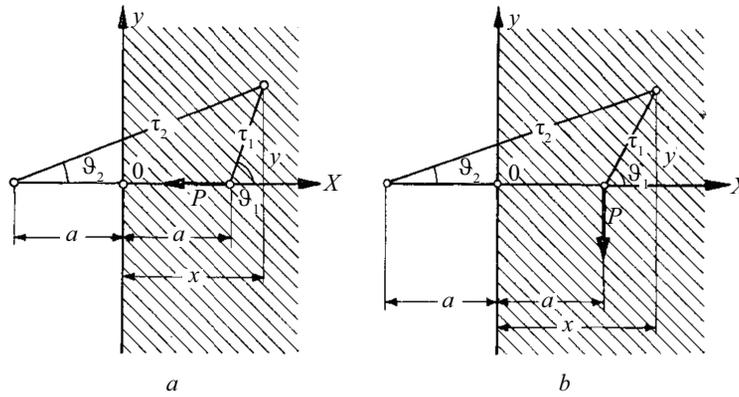


Рис. 3. Схема определения НДС при сосредоточенной нагрузке P , действующей перпендикулярно (а) и параллельно (б) ограниченному краю полупространства [15]

Fig. 3. Scheme for determining the stress-strain state under concentrated load P acting perpendicular (a) and parallel (b) to the restricted edge of the half-space [15]

Дополнительно в работе Э. Мелана рассмотрено решение задач с нагрузкой на глубине. На рис. 3 приведены схемы определения НДС при разных приложениях нагрузки относительно системы координат, но уже на глубине.

Метод решения данной задачи, как и многих других задач теории упругости, основан на введении функции напряжений Эри, из которой можно получить частные производные [16]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2}\right) = 0. \quad (1)$$

При заданных граничных условиях полупространства нормальные и касательные напряжения принимают следующие значения:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 X}{\partial y^2}; \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}; \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\partial^2 X}{\partial x \partial y}. \quad (4)$$

Далее рассмотрена постановка задачи с точечной нагрузкой на глубине, параллельной краю полупространства, так как данное положение нагрузки относительно координат соответствует приложению грунтопригруза к массиву, если верх полупространства при $x = 0$ принять за отметку поверхности земли.

В случае, когда сила действует параллельно краю, функция напряжений имеет следующий вид [15]:

$$\varphi = \frac{P}{\pi} \left(-\frac{1}{2}(x-a)(\vartheta_1 + \vartheta_2) - \frac{m-1}{4m} y \log \frac{r_1}{r_2} + \frac{m+1}{2m} \cdot \frac{axy}{r_2^2} \right). \quad (5)$$

После вторичного дифференцирования уравнения (5) значения нормальных и касательного напряжения выглядят так:

$$\sigma_x = \frac{Py}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left(\frac{(x-a)^2}{r_1^4} - \frac{a^2 - x^2 + 6ax}{r_2^4} + \frac{8axy^2}{r_2^6} \right) - \frac{m-1}{4m} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} - \frac{4x(a+x)}{r_2^4} \right) \right\}; \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{Py}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left(\frac{y^2}{r_1^4} + \frac{y^2 + 8ax + 6a^2}{r_2^4} + \frac{8ax(a+x)^2}{r_2^6} \right) + \frac{m-1}{4m} \times \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{4x(a+x)}{r_2^4} \right) \right\}; \quad (7)$$

$$\tau = \frac{Py}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left(\frac{(x-a)y^2}{r_1^4} + \frac{(2ax + y^2)(a+x)}{r_2^4} - \frac{8ax(a+x)y^2}{r_2^6} \right) + \frac{m-1}{4m} \times \left(\frac{x-a}{r_1^2} + \frac{3x+a}{r_2^2} - \frac{4x(x+a)^2}{r_2^4} \right) \right\}. \quad (8)$$

Параметры r_1 и r_2 могут быть представлены в следующей форме:

$$r_1 = \sqrt{(x-a)^2 + y^2}; \quad (9)$$

$$r_2 = \sqrt{(x+a)^2 + y^2}. \quad (10)$$

Таким образом, напряжения полупространства при $x = 0$ будут также равны нулю, в то время как $r_1/a \rightarrow 0$.

Параметр m можно найти по формуле:

$$m = \frac{1-\mu}{\mu}, \quad (11)$$

где μ — коэффициент Пуассона грунта.

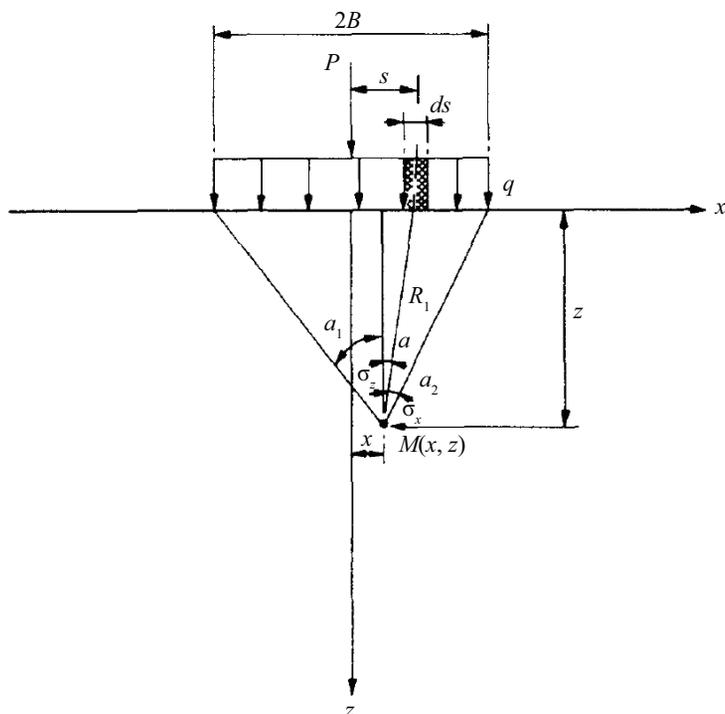


Рис. 4. Схема определения НДС с вертикальной нагрузкой, приходящей на плитный фундамент [17]

Fig. 4. Scheme for determining the stress-strain state with vertical load applied to the slab foundation [17]

В прошлом столетии ученые из Канады на основе задачи Мелана представили анализ распределения напряжений в грунтовом массиве от нагрузки на поверхности. В работе при определении НДС производится учет сборных железобетонных фундаментов мелкого заложения, обладающих более высокой несущей способностью, чем аналогичные традиционные конструктивные решения фундаментов [17].

На рис. 4 показана схема определения НДС при сосредоточенной нагрузке на поверхности в случае плитного фундамента. Результаты решения данной постановки задачи позволили обосновать применение нестандартных фундаментов из-за того, что расчеты показали, что изучаемые фундаменты обладают более высокой несущей способностью, испытывают меньшие осадки, и таким образом, позволяют достичь экономического эффекта.

Постановка задачи с сосредоточенной нагрузкой на глубине, перпендикулярной краю полупространства (рис. 3, а), получила широкое распространение из-за возможности представления этой нагрузки в распределенном виде, что позволяет моделировать нагрузки от здания с развитой подземной частью [18], нагрузку от фундамента глубокого заложения [19] и даже определить осадку окружающей застройки с учетом горизонтального смещения ограждающей конструкции котлована и ее жесткости [20, 21].

И.Н. Лузин в своей публикации приводит постановку задачи с равномерно распределенной нагрузкой по количественной оценке НДС основания фундамента глубокого заложения с учетом воз-

действия на него всего грунтоцементного массива, включая боковые грунтовые призмы [18].

Приложенная нагрузка находится на глубине d шириной распределения $2a$, далее в пределах от $-a$ до a осуществляется интегрирование, при этом x заменяется $x - \xi$, а P — на $q \times d\xi$ (рис. 5) [18].

При этом переменные r_1 и r_2 описываются по формуле:

$$r_1^2 = (x - \xi)^2 + (z - d)^2; \quad (12)$$

$$r_2^2 = (x - \xi)^2 + (z + d)^2. \quad (13)$$

В труде Ю.В. Ваниной данная постановка задачи была доработана и применена для оценки НДС массива грунта при влиянии здания, представленного в виде распределенной нагрузки, в непосредственной близости от ограждения котлована [19].

При такой схеме определения НДС задача решается в четверти пространства, а полоса нагрузки получается шириной $B = 2a + 2f$ с вычетом эквивалентной, но противоположной по значению, нагрузки по полосе $2f$ (рис. 6). Параметр f представляет собой расстояние от ограждения котлована до нагрузки, а вертикальная ось при этом является осью симметрии для нагрузки B и вместе с тем ограждением котлована [19].

Также на основании задачи Мелана была представлена модель для анализа нагрузки и деформаций ограждения котлована [20]. В данной работе автор вывел метод расчета коэффициента горизонтальной жесткости ограждения K . Этот параметр зависит от коэффициента Пуассона, модуля дефор-

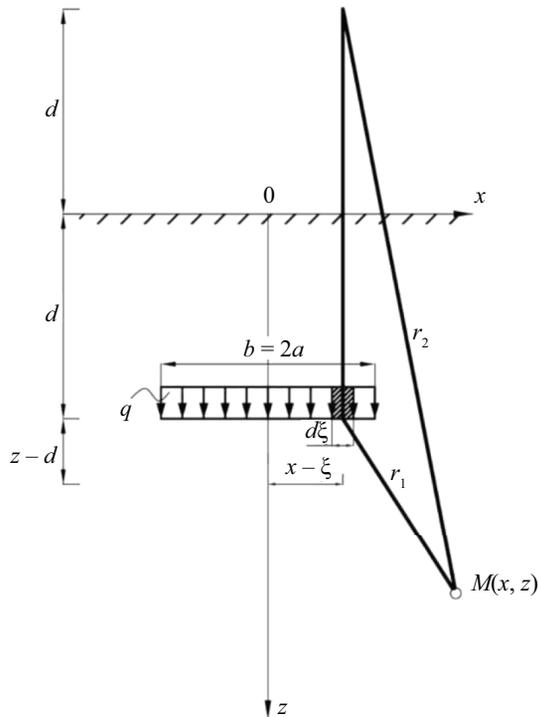


Рис. 5. Схема определения НДС при распределенной нагрузке q , действующей перпендикулярно краю ограниченного полупространства [18]

Fig. 5. Scheme for determining the stress-strain state under distributed load q acting perpendicular to the edge of the bounded half-space [18]

мации грунта, а также от величины горизонтальных напряжений, которые можно найти по формуле:

$$\sigma_x = \int_{d_1}^{d_2} \frac{qx}{2\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{(z-d)^2}{r_1^4} - \frac{d^2 - z^2 + 6dz}{r_1^4} + \frac{8d zx^2}{r_2^6} - \frac{1-2\mu}{2} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} - \frac{4z(d+z)}{r_2^4} \right) \right\} dd, \quad (14)$$

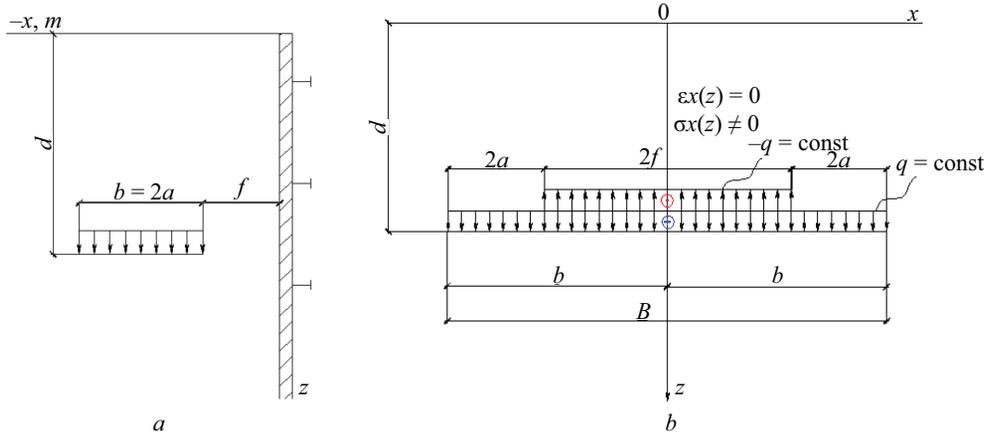


Рис. 6. Итоговый вид нагрузки на глубине для определения НДС основания (а); схема определения нагрузки для расчета НДС (b) [19]

Fig. 6. Final view of the load at depth for determining the stress-strain state of the foundation (a); scheme for determining the load for calculating the stress-strain state (b) [19]

где q — распределенная нагрузка; d_1 — глубина верха равномерно распределенной полосовой нагрузки; d_2 — глубина нижней части равномерно распределенной полосовой нагрузки.

С.А. Казаченко представил задачу для определения НДС массива грунта после откопки котлована с сосредоточенной вертикальной нагрузкой (уравнение (15)), проинтегрированной по ширине котлована, и сосредоточенной горизонтальной нагрузкой (уравнение (16)), проинтегрированной по высоте котлована [21]:

$$P = \gamma \cdot s; \quad (15)$$

$$Q = \omega \cdot \gamma \cdot s, \quad (16)$$

где ω — коэффициент бокового давления; γ — удельный вес грунта; s — глубина котлована.

Предложенное решение позволяет оценить изменение НДС массива от устройства котлованов на окружающую застройку, дополнительно решение задачи легло в основу численно-аналитического метода, который дает возможность определить необходимую жесткость ограждения котлована для минимального воздействия на здания и сооружения [21].

Цель настоящего исследования — адаптировать постановку задачи Мелана с горизонтальной нагрузкой, как это было сделано в работе [20], для оценки изменения НДС грунтового массива перед забоем тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК) от приложения грунтопригруза.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы для определения напряжений, представленные ниже, в однородном грунтовом полупространстве основаны на теории упругости и соответствуют стабилизированному напряженному состоянию с учетом природного давления грунта.

В задаче рассматривается влияние распределенной нагрузки $q = \text{const}$, направленной параллель-

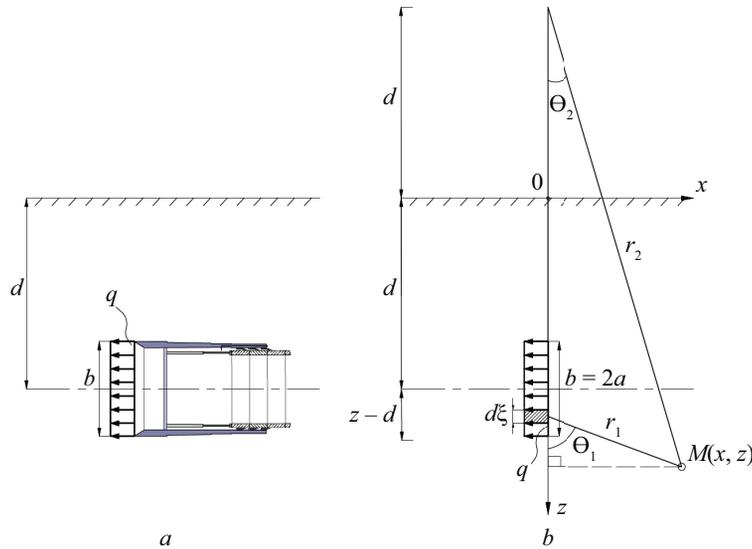


Рис. 7. Схема определения НДС при действии давления пригруза ТПМК на забой (а); расчетная схема для определения НДС грунтового массива при проходке ТПМК с применением пригруза (б)

Fig. 7. Scheme for determining the stress-strain state under the action of the face-support pressure of the TBM (a); calculation scheme for determining the stress-strain state of the soil mass during tunnelling with the use of the face-support pressure (b)

но оси x , центр которой расположен на глубине d , на НДС полупространства (рис. 7). Постановка задачи соответствует этапу перед разработкой грунта для установки сборного железобетонного кольца обделки в проектное положение. Итоговые изополя напряжений и деформаций получены для четверти плоскости относительно вертикальной оси z .

Исходные уравнения (17), (18) для определения компонентов напряжений были использованы в решении данной задачи и представлены для равномерно распределенной нагрузки. Аналогично работе [20] задача может быть решена интегрированием в пределах от $-a$ до a , где $-a$ — это низ приложения давления пригруза, a — верх линейной нагрузки:

$$\sigma_z = \int_{-a}^a \frac{qx}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left(\frac{(z-\xi-d)^2}{r_1^4} - \frac{d^2 - (z-\xi)^2 + 6d(z-\xi) + 8d(z-\xi)x^2}{r_2^4} + \frac{8d(z-\xi)x^2}{r_2^6} \right) - \frac{m-1}{4m} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} - \frac{4(z-\xi)(d+z-\xi)}{r_2^4} \right) \right\}; \quad (17)$$

$$\sigma_x = \int_{-a}^a \frac{qx}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left(\frac{x^2}{r_1^4} + \frac{x^2 + 8d(z-\xi) + 6d^2}{r_2^4} + \frac{8d(z-\xi)(d+(z-\xi))^2}{r_2^6} \right) + \frac{m-1}{4m} \times \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{4(z-\xi)(d+(z-\xi))}{r_2^4} \right) \right\}. \quad (18)$$

Массив, в котором определяется напряжение, разделен на две независимые области, используя нагрузку в качестве границы (при $x = 0$). Правая сторона — это массив, который располагается за линией

действия пригруза. Левая сторона — часть массива, которая находится перед забоем ТПМК и является предметом исследования в данной задаче. Две области являются асимметричными при таком расположении нагрузки и могут быть бесконечно увеличены.

Для расчета напряжений грунт рассматривается как однородный, изотропный и с постоянным модулем деформации.

По сформированным аналитическим уравнениям в программной среде MathCAD составлены изополя вертикальных, горизонтальных напряжений (рис. 8, 9) и деформаций (рис. 10). Затем выполнено сопоставление полученных изополей с изополями, которые построены в программном комплексе (ПК) Plaxis 2D с аналогичными параметрами для проверки достоверности результатов.

Все расчеты проводились в бесконечном полупространстве в упругой постановке при плоской деформации, однако для лучшей визуализации результаты представлены в четверти пространства, а точнее для левой стороны исследуемого массива.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера приведены результаты расчета при глубине залегания центра нагрузки $d = 27,3$ м и величине $q = 250$ кПа, модуль деформации грунта $E = 23$ кПа, удельный вес $\gamma = 19$ кПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$ для ТПМК с диаметром резания 6,28 м.

Изополя напряжений четверти пространства σ_z и σ_x , построенные по формулам (17), (18), и созданные в программной среде MathCAD, а также изолинии напряжений для сравнения из ПК Plaxis 2D представлены на рис. 8.

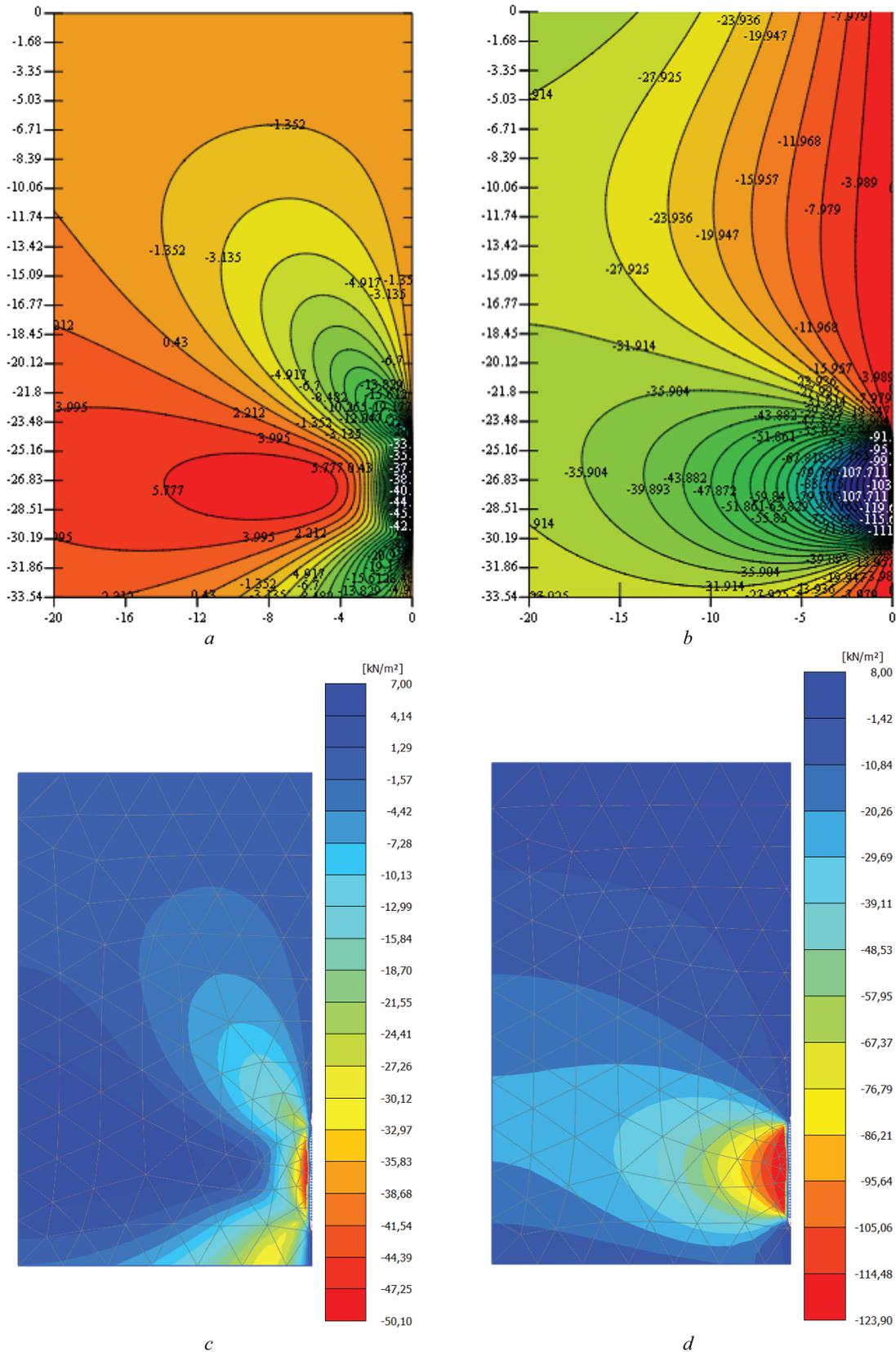


Рис. 8. Изополя напряжений при приложении давления пригруза к массиву грунта: вертикальные напряжения σ_z , полученные в MathCad (a); горизонтальные напряжения σ_x , полученные в MathCad (b); вертикальные напряжения σ_z , полученные в Plaxis 2D (c); горизонтальные напряжения σ_x , полученные в Plaxis 2D (d)

Fig. 8. Stress isopoles under the face-support pressure applied to the soil mass: vertical stresses σ_z , obtained in MathCad (a); horizontal stresses σ_x , obtained in MathCad (b); vertical stresses σ_z , obtained in Plaxis 2D (c); horizontal stresses σ_x , obtained in Plaxis 2D (d)

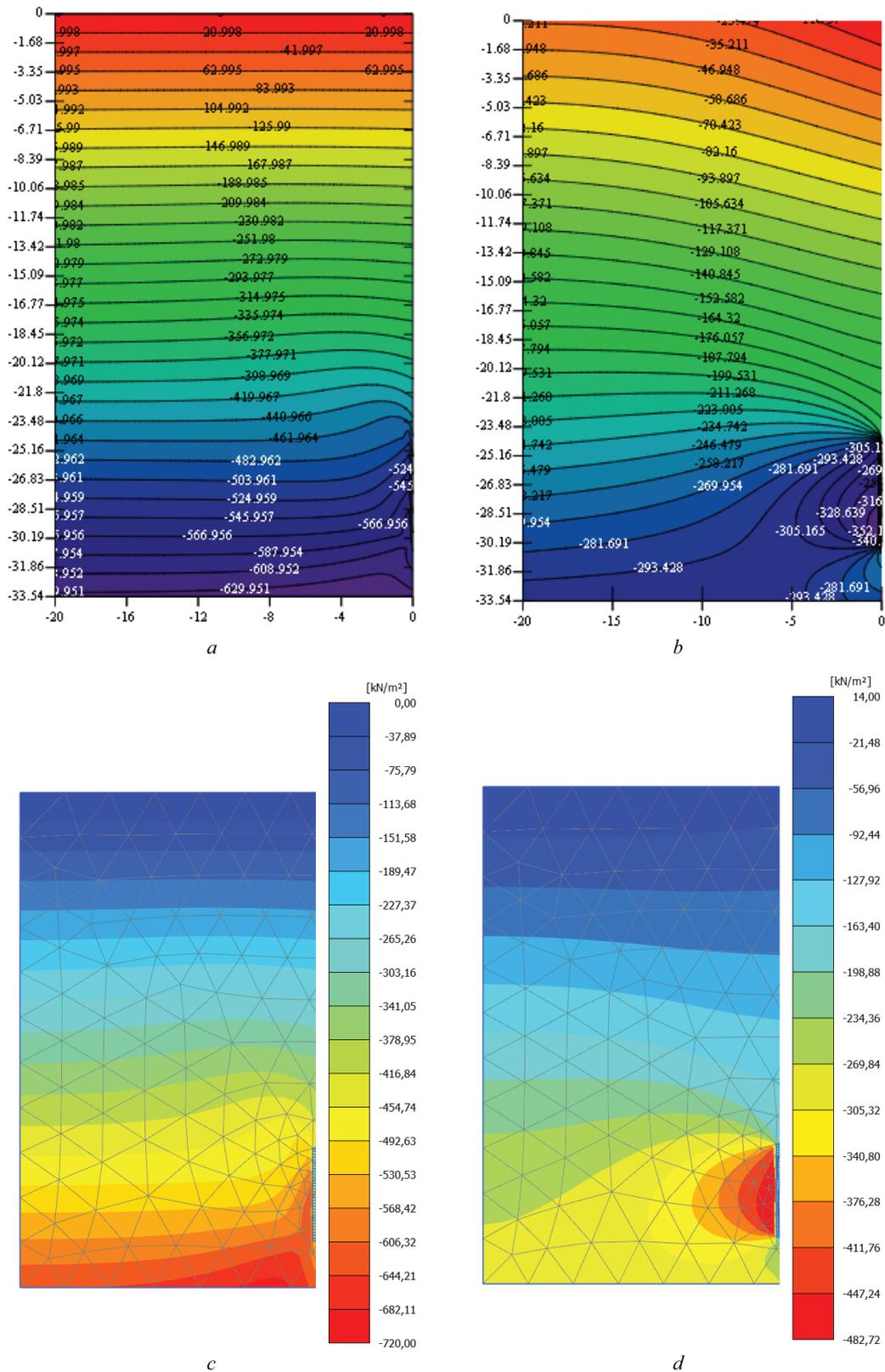


Рис. 9. Изополя напряжений при приложении давления пригруза к грунтовому массиву с учетом напряжений от собственного веса грунта γ_h : вертикальные напряжения P_z , полученные в MathCad (a); горизонтальные напряжения P_x , полученные в MathCad (b); вертикальные напряжения P_z , полученные в Plaxis 2D (c); горизонтальные напряжения P_x , полученные в Plaxis 2D (d)

Fig. 9. Stress isopoles under the face-support pressure applied to the soil mass, considering stresses from the own weight of the soil γ_h : vertical stresses P_z , obtained in MathCad (a); horizontal stresses P_x , obtained in MathCad (b); vertical stresses P_z , obtained in Plaxis 2D (c); horizontal stresses P_x , obtained in Plaxis 2D (d)

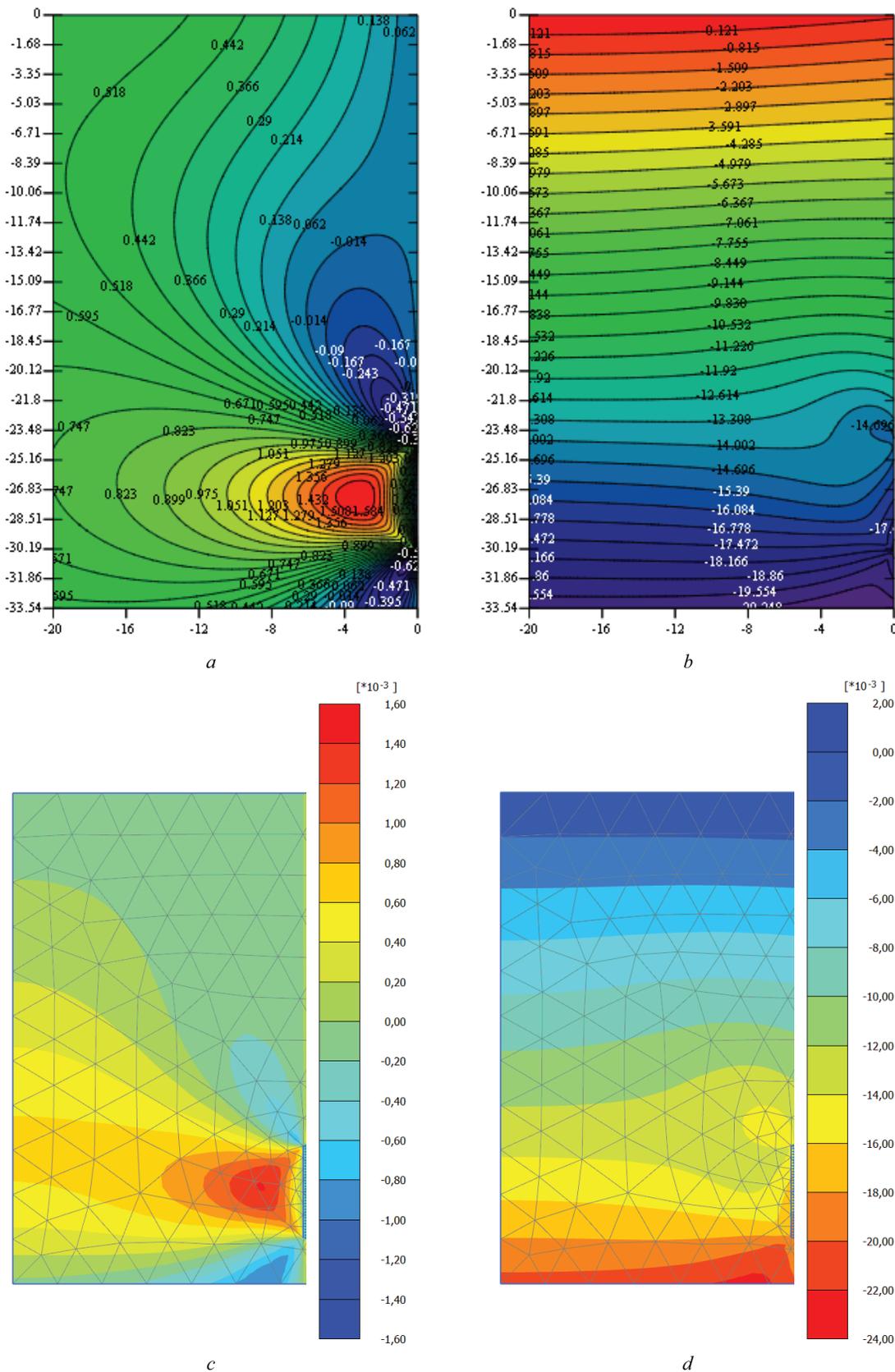


Рис. 10. Изополя вертикальных деформаций ϵ_z при приложении давления пригруза к массиву: деформации без учета веса грунта, полученные в MathCad (a); деформации с учетом веса грунта, полученные в MathCad (b); деформации без учета веса грунта, полученные в Plaxis 2D (c); деформации с учетом веса грунта, полученные в Plaxis 2D (d)

Fig. 10. Isopoles of vertical deformations ϵ_z applying the face-support pressure to the soil mass: deformations without considering soil weight, obtained in MathCad (a); deformations with considering soil weight, obtained in MathCad (b); deformations without considering soil weight, obtained in Plaxis 2D (c); deformations with considering soil weight, obtained in Plaxis 2D (d)

Дополнительно были получены изополя напряжений грунтового массива при действии на него давления пригруза с учетом напряжений от собственного веса грунта ($P_z = \sigma_z + \gamma_h$ и $P_x = \sigma_x + \gamma_h$, где h — глубина расчетной области) с целью создания более правдоподобного НДС массива грунта при прокладке тоннелей. Взвешивающее действие воды в данной постановке не учитывалось. На рис. 9 показаны результаты построения аналитических уравнений в MathCAD и результаты численного моделирования в Plaxis 2D для вертикальных P_z (рис. 9, *b, d*) и горизонтальных напряжений P_x (рис. 9, *a, c*).

Аналогично вертикальным напряжениям грунтового массива авторы составили изополя вертикальных деформаций, которые при простых преобразованиях интересны для анализа из-за того, что полученные результаты можно сравнить с данными геотехнического мониторинга. Поскольку в большинстве случаев наблюдение ведется за вертикальными перемещениями дневной поверхности, основной интерес представляют именно вертикальные деформации ε_z и связанные с ними вертикальные дополнительные перемещения u_z .

В рамках данной задачи аналитическим путем дополнительные деформации можно определить с помощью закона Гука в условиях плоского деформирования (при $\varepsilon_y = 0$), который записывается следующим образом:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu}{E} [\sigma_x (1 + \sigma_z) + \sigma_z \cdot \mu]. \quad (19)$$

Полученные по формуле (19) изополя деформаций с учетом напряжений от собственного веса грунта и без представлены на рис. 10, *a, b*.

Вертикальные деформации u_z с целью сравнения их с натурными данными можно определить интегрированием относительной вертикальной деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования авторами сформулирован вариант задачи Мелана, который учитывает горизонтальное воздействие нагрузки на определенной глубине параллельно земной поверхности с целью анализа влияния НДС массива грунта перед забоем. Адаптация модели путем включения параметров напряжений, вызванных собственным весом грунта, позволила достичь более высокой степени соответствия с естественным НДС массива грунта в процессе проходки.

Анализ результатов (рис. 8, 9) показывает, что изополя количественно и качественно схожи между собой, расхождение максимальных прогнозируемых дополнительных напряжений в программной среде MathCAD и ПК Plaxis 2D составляет 12 и 4 % для вертикальных и горизонтальных напряжений соответственно.

Аналогично напряжениям распределение вертикальных деформаций ε_z демонстрирует схожесть с изополями, определенными в процессе верификации в используемом ПК, при этом максимальное отклонение значений составило 13 %.

В рамках задачи оценки влияния от строительства тоннелей на окружающую застройку рекомендуется учитывать изменение НДС массива грунта в приповерхностной зоне проходки. Предложенный авторами метод при соответствующей модификации можно адаптировать для корректировки давления пригруза, что необходимо как для обеспечения устойчивости забоя в ходе строительства тоннеля, так и для минимизации влияния на поверхность грунта от пригруза.

С помощью полученных деформаций можно вычислить оседание поверхности для последующего сопоставления с результатами геотехнического мониторинга. Следовательно, в дальнейшем авторы ставят перед собой задачу выполнить сравнение текущих результатов с данными, полученными в ходе проведения геотехнического мониторинга дневной поверхности, в целях верификации применимости данного метода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мазеин С.В., Вознесенский А.С. Опыт тоннельной щитовой проходки с гидропригрузом // Метро и тоннели. 2019. № 1. С. 14–17. EDN PPYGWR.
2. Протосеня А.Г., Беяков Н.А., Тхай Д.Н. Разработка метода прогноза давления пригруза забоя и осадок земной поверхности при строительстве тоннелей механизированными проходческими комплексами // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 53–63. EDN TQMGPRV.
3. Протодьяконов М.М. Давление горных пород на рудничную крепь // Горный журнал. 1907.
4. Ter-Martirosyan A.Z., Cherkesov R.H., Isaev I.O., Shishkina V.V. Surface settlement during tunneling: field observation analysis // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 19. P. 9963. DOI: 10.3390/app121-99963
5. Тер-Мартirosян А.З., Черкесов Р.Х., Исаев И.О., Рудь В.В. Фактическое значение коэффициента перебора для тоннелей в дисперсных и скальных грунтах // Жилищное строительство. 2023. № 9. С. 61–73. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-9-61-73. EDN UBBWQA.

6. *Horn N.* Horizontal earth pressure on perpendicular tunnel face // Proceedings of the Hungarian National Conference of the Foundation Engineer Industry. 1961.
7. *Janssen H.A.* Versuche tiber Getreidedruck in Silozellen // Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure. 1895. Vol. 35. Pp. 1045–1049.
8. *Фрид М.* Результаты опытов давления зерна на дно и стены глубоких сосудов // Мукомольно-пищевая промышленность. 1890. С. 921–933.
9. *Anagnostou G., Kovari K.* Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields // Tunnelling and Underground Space Technology. 1996. Vol. 11. Issue 2. Pp. 165–173. DOI: 10.1016/0886-7798(96)00017-x
10. *Anagnostou G.* The contribution of horizontal arching to tunnel face stability // Geotechnik. 2012. Vol. 35. Issue 1. Pp. 34–44. DOI: 10.1002/gete.201100024
11. *Leca E., Dormieux L.* Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material // Géotechnique. 1990. Vol. 40. Issue 4. Pp. 581–606. DOI: 10.1680/geot.1990.40.4.581
12. *Yuan S., Feng D., Zhang S., Xing Y., Ke Z.* Stability analysis of shield tunnel face considering spatial variability of hydraulic parameters // Rock and Soil Mechanics. 2022. Vol. 43. Issue 11. Pp. 3153–3162. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2200
13. *Chang Y., Cao P., Zhang J., Fan Z., Xie W., Liu Z. et al.* Face stability of tunnel in multi-stratum: limit analysis and numerical simulation // Geotechnical and Geological Engineering. 2023. Vol. 41. Issue 5. Pp. 3203–3215. DOI: 10.1007/s10706-023-02453-1
14. *Wang W., Liu H., Deng R., Wang Y.* Active stability analysis of 3D tunnel face in nonhomogeneous and anisotropic soils // Geotechnical and Geological Engineering. 2023. Vol. 41. Issue 5. Pp. 3013–3033. DOI: 10.1007/s10706-023-02442-4
15. *Melan E.* Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1932. Vol. 12. Issue 6. Pp. 343–346. DOI: 10.1002/zamm.19320120603
16. *Airy G.B.* On the strains in the interior of beams // Proceedings of the Royal Society of London. 1863. Vol. 12. Pp. 304–306. DOI: 10.1098/rspl.1862.0068
17. *Hanna A.M., Hadid W.H.* New models for shallow foundations // Mathematical Modelling. 1987. Vol. 9. Issue 11. Pp. 799–811. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90500-8
18. *Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Лузин И.Н.* Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов глубокого заложения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 2. С. 96–103. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.09. EDN YYZKHJ.
19. *Ter-Martirosyan Z.G., Vanina Y.V.* Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1928. Issue 1. P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012004
20. *Hu Q.* Retaining structure force-deformation analysis model for an ultradeep foundation pit // Mathematical Problems in Engineering. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–18. DOI: 10.1155/2013/549491
21. *Зерцалов М.Г., Казаченко С.А.* Численно-аналитический метод инженерной оценки влияния разработки котлована на перемещения прилегающего к нему грунтового массива с учетом жесткости ограждающей конструкции // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 3. С. 396–409. DOI: 10.33113/mkmc.ras.2021.27.03.396_409.07. EDN FPQJTC.

Поступила в редакцию 25 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 2 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Завенович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, проректор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675967; Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Виктория Владимировна Рудь — младший научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 992433; Scopus: 58295443600, ORCID: 0000-0003-0596-336X; victoriadll@yandex.ru.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян А.З. — идея, концепция исследования, развитие методологии, научное руководство и редактирование текста.

Рудь В.В. — проведение аналитических расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mazein S.V., Voznesenskiy A.S. Experience of shield tunneling with hydro face-support pressure. *Metro and Tunnels*. 2019; 1:14-17. EDN PPYGWR. (rus.).
2. Protosenya A.G., Belyakov N.A., Tkhai D.N. Development of a method for forecasting face-support pressure and ground settlement during tunnel construction with mechanized tunneling complexes. *Journal of Mining Institute*. 2015; 211:53-63. EDN TQMGPV. (rus.).
3. Protod'yakonov M.M. Pressure of rock formations on mine supports. *Mining Journal*. 1907. (rus.).
4. Ter-Martirosyan A.Z., Cherkesov R.H., Isaev I.O., Shishkina V.V. Surface settlement during tunneling: field observation analysis. *Applied Sciences*. 2022; 12(19):9963. DOI: 10.3390/app12199963
5. Ter-Martirosyan A.Z., Cherkesov R.H., Isaev I.O., Rud V.V. The actual volume loss of soil coefficient for tunnels in cohesive and rock soils. *Housing Construction*. 2023; 9:61-73. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-9-61-73. EDN UBBWQA. (rus.).
6. Horn N. Horizontal earth pressure on perpendicular tunnel face. *Proceedings of the Hungarian National Conference of the Foundation Engineer Industry*. 1961.
7. Janssen H.A. Experiments on grain pressure in silo cells. *Journal of the Association of German Engineers*. 1895; 35:1045-1049.
8. Frid M. Results of experiments on the pressure of grain on the bottom and walls of deep vessels. *Flour and Food Industry*. 1890; 921-933. (rus.).
9. Anagnostou G., Kovari K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1996; 11(2):165-173. DOI: 10.1016/0886-7798(96)00017-x
10. Anagnostou G. The contribution of horizontal arching to tunnel face stability. *Geotechnik*. 2012; 35(1):34-44. DOI: 10.1002/gete.201100024
11. Leca E., Dormieux L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material. *Géotechnique*. 1990; 40(4):581-606. DOI: 10.1680/geot.1990.40.4.581
12. Yuan S., Feng D., Zhang S., Xing Y., Ke Z. Stability analysis of shield tunnel face considering spatial variability of hydraulic parameters. *Rock and Soil Mechanics*. 2022; 43(11):3153-3162. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2200
13. Chang Y., Cao P., Zhang J., Fan Z., Xie W., Liu Z. et al. Face stability of tunnel in multi-stratum: limit analysis and numerical simulation. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023; 41(5):3203-3215. DOI: 10.1007/s10706-023-02453-1
14. Wang W., Liu H., Deng R., Wang Y. Active stability analysis of 3D tunnel face in nonhomogeneous and anisotropic soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023; 41(5):3013-3033. DOI: 10.1007/s10706-023-02442-4
15. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe. *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1932; 12(6):343-346. DOI: 10.1002/zamm.19320120603
16. Airy G.B. On the strains in the interior of beams. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1863; 12:304-306. DOI: 10.1098/rsp1.1862.0068
17. Hanna A.M., Hadid W.H. New models for shallow foundations. *Mathematical Modelling*. 1987; 9(11):799-811. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90500-8
18. Ter-Martirosian A.Z., Ter-Martirosian Z.G., Luzin I.N. Stress-strain condition of base of deep foundations. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2017; 8(2):96-103. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.09. EDN YYZKHJ. (rus.).
19. Ter-Martirosyan Z.G., Vanina Y.V. Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1928(1):012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012004
20. Hu Q. Retaining structure force-deformation analysis model for an ultradeep foundation pit. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013; 2013:1-18. DOI: 10.1155/2013/549491
21. Zertsalov M.G., Kazachenko S.A. Numerical-analytical method of engineering assessment of the impact of the development of the pit on the movement of the adjacent soil mass, taking into account the rigidity of the fencing of the pit. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2021; 27(3):396-409. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.03.396_409.07. EDN FPQJTC. (rus.).

Received March 25, 2024.

Adopted in revised form on March 26, 2024.

Approved for publication on May 2, 2024.

BIOTNOTES: **Armen Z. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Vice-rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 675967; Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Victoria V. Rud — Junior Researcher, Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 992433, Scopus: 58295443600, ORCID: 0000-0003-0596-336X; victoriadll@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Armen Z. Ter-Martirosyan — idea, concept of research, development of methodology, scientific guidance and text editing.

Victoria V. Rud — the product of analytical calculations, writing the source text, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 658.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1006-1015

Информатизация организации строительного производства и оперативного управления

Владимир Вячеславович Сокольников¹, Максим Вилленинович Молодцов²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен вопрос зависимости напряженности оперативного управления строительным производством от организации взаимодействия ключевых исполнителей производства, служб и руководства строительного предприятия.

Материалы и методы. Представлен метод координирования решений текущих производственных, обеспечивающих и управленческих задач на основе единой структуры алгоритмов выполнения технологических процессов в проектных отметках сооружения, организации производственной деятельности на строительном участке и оперативного управления. Предложено определение напряженности оперативного управления как меры эффективности организации взаимодействия производства, служб и руководства предприятия.

Результаты. Получен вид аналитической непрерывной, кусочно-линейной зависимости напряженности оперативного управления выполнением строительного технологического процесса от скоординированности значений параметров организации строительного производства (ОСП): его обеспеченности ресурсами, а также соблюдения требований строительного контроля в условиях меняющейся производственной ситуации. Получены формула напряженности оперативного управления выполнением монтажно-укладочного технологического процесса в конкретных проектных отметках сооружения в установленные сроки; параметры математической модели напряженности оперативного управления, а также цифровой интерфейс ее использования; граничные значения для переменных области определения допустимых значений параметров организации технологических процессов, обеспечивающих мероприятий, материального снабжения, а также относительная шкала для напряженности оперативного управления. Получены и проанализированы графики изменения напряженности оперативного управления в ходе выполнения техпроцесса в локальных проектных отметках сооружения.

Выводы. Сделан вывод о формировании единой информационной среды ОСП в период строительно-монтажных работ и оперативного управления посредством совместимых алгоритмов, структур данных и интерфейсов автоматизированных рабочих мест на основе математической модели, координирующей по параметрам организации строительного производства и оперативного управления алгоритмы решения производственных задач и коммуникацию ключевых исполнителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оперативное управление, координирование и алгоритмизация коммуникации исполнителей, математическая модель, производственные задачи организации строительного производства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сокольников В.В., Молодцов М.В. Информатизация организации строительного производства и оперативного управления // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 1006–1015. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1006-1015

Автор, ответственный за переписку: Владимир Вячеславович Сокольников, vschief@yandex.ru.

Informatization of construction production organization and operational management

Vladimir V. Sokolnikov¹, Maksim V. Molodtsov²

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS); St. Petersburg, Russian Federation;

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The question of the dependence of the intensity of the operational management of construction production on the organization of interaction between key production executors, services and management of a construction enterprise is considered.

Materials and methods. The method of coordinating solutions of current production, support and management tasks based on a unified structure of algorithms of technological processes in the design elevations of the structure, the organization of production activities at the construction site and operational management is presented. The definition of the intensity of operational management as a measure of the effectiveness of the organization of interaction between production, services and management of the enterprise is proposed.

Results. The form of analytical continuous, piecewise linear dependence of the intensity of the operational management of the construction process on the coordination of the values of the parameters of the organization of construction production is obtained: its provision with resources, as well as compliance with the requirements of construction control in a changing production situation. The formula for the intensity of operational management of the implementation of the assembly and laying technological process in specific design elevations of the structure within the established timeframes was obtained. The parameters of the mathematical model of the intensity of operational control, as well as the digital interface for its use, are obtained. Boundary values for the variables of the domain of determination of the permissible values of the parameters of the organization of technological processes, providing measures, material supply, as well as a relative scale for the intensity of operational management are obtained. Graphs of changes in the intensity of operational control during the execution of the technical process in the local design elevations of the structure were obtained and analyzed.

Conclusions. The conclusion is made about the formation of a unified information environment for the organization of construction production during construction and operational management through compatible algorithms, data structures and AWS interfaces based on a mathematical model that coordinates the algorithms for solving production problems and communication of key performers in terms of the parameters of the organization of construction production and operational management.

KEYWORDS: operational management, coordination and algorithmization of communication of performers, mathematical model, production tasks of the organization of construction production

FOR CITATION: Sokolnikov V.V., Molodtsov M.V. Informatization of construction production organization and operational management. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):1006-1015. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1006-1015 (rus.).

Corresponding author: Vladimir V. Sokolnikov, vschief@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена вопросам формирования цифровой платформы организации и управления производственной деятельностью строительного предприятия [1, 2]. Как известно [3], задачами организации строительного производства (ОСП) являются:

1. Обеспечение законности строительных работ, а также последующей эксплуатации законченного строительством объекта капитального строительства (ОКС).

2. Минимизация как числа опасных факторов строительного производства, так и степени их влияния на ход выполнения работ.

3. Рациональное использование людских ресурсов, а также расходования материально-технических ресурсов.

4. Возможное сокращение продолжительности возведения объекта.

5. Установление в период проектной подготовки плановых сроков возведения объекта, сроков и объемов потребности в ресурсах по периодам строительства, а также рационального размещения строительного приобъектного хозяйства.

6. Обеспечение в основной период строительно-монтажных работ (СМР) выполнения плановых сроков строительства путем поддержания необходимых темпа и ритма строительных работ.

7. Установление и поддержание максимального соответствия пространственной и хронологической последовательности выполнения техпроцессов объемно-планировочным и конструктивным проектным решениям объекта строительства.

8. Установление и поддержание максимально соответствия порядка ресурсного обеспечения

строительного производства порядку выполнения технологических процессов в проектных отметках текущей строительной готовности объекта.

9. Обеспечение выполнения требований строительного контроля.

10. Алгоритмизация и координирование актуальных процессов посредством коммуникации их исполнителей.

Из перечисленного следует, что большинство задач ОСП в главный период СМР имеют принципиально другую направленность по сравнению с задачами ОСП в период проектной подготовки [4], а следовательно, и другие методы их решения [5]. Методы оперативного управления, как и методы решения задач ОСП, в основной период СМР до настоящего времени не алгоритмизированы и не формируют единой структуры [6].

Исследованиями в области информатизации строительных процессов и управления, оценки надежности различных аспектов строительной деятельности занимались многие отечественные авторы. Указанные исследования выполнялись с целью решения методологических [7] и локальных задач проектирования строительных процессов [8, 9], планирования строительства [10] и ресурсного обеспечения [11], возведения объектов [12, 13], организационно-технологических решений при возведении [14, 15], проектной и организационно-технической подготовки строительного производства [16, 17].

Анализ доступных зарубежных литературных источников позволяет сделать вывод, что в области теоретических исследований оперативного управления и ОСП в период СМР зарубежные источники рассматривают такие задачи, как Decision making [18–20],

Secure Information Model [21], Project management [22], Project Risk [23, 24], Control Project Cost Escalation [25], Optimal resource utilization [26], однако каких-либо исследований, направленных на теоретическое моделирование в сфере информатизации оперативного управления и ОСП, не выявлено.

Вопросам оперативного управления в увязке с ОСП в период СМР не уделялось должного внимания [27]. Вместе с тем технические возможности ИТ в части алгоритмизации и коммуникации на современном этапе, а также теоретическая база ОСП и управления позволяют поставить вопрос о формировании единой цифровой платформы ОСП [28] и оперативного управления производственной и обеспечивающей деятельностью предприятия, а не только производством на строительных участках [29, 30].

Цель настоящего исследования — теоретическое обоснование системы аналитических зависимостей значений параметров оперативного управления и параметров ОСП, связанных алгоритмами, координирующими взаимодействие исполнителей при коллективном решении текущих производственных и управленческих задач.

Ключевые задачи исследования:

- определение номенклатуры, а также структуры параметров оперативного управления, ОСП в основной период строительства, количественная оценка их значений и диапазон изменений;
- установление вида, интерпретация, а также разработка интерфейса представления аналитической связи параметров оперативного управления и ОСП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы оперативного управления тесно взаимодействуют с методами решения задач ОСП в основной период СМР [31], при этом граничными условиями для решений оперативного управления служат параметры ОСП [32], полученные в период проектирования. Таковыми являются параметры календарного плана и, в частности, графика работ.

Гипотеза, закладываемая в теоретическую модель координирования методов оперативного управления и ОСП, отражает подобие следующему главному соотношению системы организации и управления: «Чем выше напряженность управления в данный момент, тем хуже организация взаимодействия управления и производства в предыдущий период». Используя метод формальной логики, применяемый в общей теории систем [20], высказанную гипотезу можно формализовать в виде (1) и (2):

$$\begin{cases} [\bar{S}_{org} \cdot \bar{Q}_{rb}] \cdot F_{zatr} = \bar{Q}_{smr} \cdot \bar{T}_s \cdot (F_{budj} - F_{zatr}); \\ Y(\bar{S}_{org}) = f\left(x_1; \left(\frac{DATA_{start} - DATA_{end}}{DATA_{end} - DATA_{tek}}\right)\right), \end{cases} \quad (1)$$

где \bar{S}_{org} — множество параметров документированных алгоритмов оперативного управления (регули-

рования) расходом ресурсов на поддержание непрерывности выполнения техпроцессов и их обеспечение: *в линейном приближении* — число автоматизированных алгоритмов, связывающих параметры оперативного управления и параметры организации строительства; $Y(\bar{S}_{org})$ — главное соотношение системы переменных организации производственной деятельности строительного предприятия: баланс линейных комбинаций \bar{S}_{org} , \bar{Q}_{rb} , \bar{Q}_{smr} , \bar{T}_s , F_{budj} и F_{zatr} ; $DATA_{start}$, $DATA_{end}$ — приемлемые даты начала и окончания как организационно-управленческой рабочей процедуры, так и выполнения техпроцесса, обусловленные графиком работ.

$$x_1 = f_1\left(\frac{\bar{Q}_{smr} \cdot \bar{T}_s \cdot (F_{budj} - F_{zatr})}{\bar{Q}_{rb} \cdot F_{zatr}}\right), \quad (2)$$

где \bar{Q}_{smr} — множество параметров, обеспечивающих в строительном предприятии уровень качества СМР: *потери рабочего времени и материальных ресурсов на исправления брака*; \bar{T}_s — множество параметров текущего уровня организационного развития строительного предприятия: *в линейном приближении* — число автоматизированных процедур оперативного управления и организации; F_{budj} , F_{zatr} — финансовые параметры строительного предприятия: показатели бюджета и затрат соответственно; \bar{Q}_{rb} — множество параметров текущего уровня качества ресурсной базы строительного предприятия: *в линейном приближении* — число организационных и производственных задач, решаемых за счет собственных ресурсов строительного предприятия.

Полученное выражение (1) содержит в явном виде соотношение дат календарного графика работ при имеющихся ресурсных параметрах выполнения текущих техпроцессов. В свою очередь, высказанная гипотеза, соответствующая ей формализация параметров и временные соотношения в выражении (1) позволяют выполнить соответствующие преобразования для получения связывающей их аналитической зависимости (3) и (4). Для обозначения физического смысла этой зависимости целесообразно использовать понятие «напряженности оперативного управления технологическими и обеспечивающими процессами».

Текущая напряженность оперативного управления выполнением в плановые сроки каждого строительного процесса и обеспечивающих мероприятий H_{ou_proc} интерпретируется как характеристика эффективности организации производства в оперативные промежутки основного периода СМР. H_{ou_proc} следует определить как «меру соответствия: фактической обеспеченности ресурсами строительного процесса — текущей потребности, а также недельно-суточного графика работ — базовому календарному графику в условиях текущих вне- и внутрисплощадочных ограничений выполнения техпроцесса».

Согласно данному определению, H_{ou_proc} в общем случае зависит от следующих факторов (пере-

менных) ОСП: δ_{Vstat} — показатель заявленной текущей потребности в ресурсе; δ_{conv} — показатель обеспечения заявленной потребности; δ_{VT} — показатель своевременности выполнения монтажно-укладочного процесса; δ_{lim} — показатель вне- и внутриплощадочных текущих организационных, технических и административно-правовых ограничений выполнения технологического процесса или преобразования состояния ресурсов:

$$N_{\text{оу_проц}} = f(\delta_{lim}, \delta_{Vstat}, \delta_{conv}, \delta_{VT}). \quad (3)$$

При этом преобразования состояния ресурсов выполняют по схеме соотношения δ_{Vstat} и δ_{conv} , скоординированной с графиком выполнения техпроцесса, или комплекса техпроцессов. Координацию выполняют путем фиксации и анализа дат установления наличия и потребного количества ресурса в цепочке записей (документов): «спецификация – смета – заявки производственного участка службе снабжения – заказы поставщику – счета на оплату ресурса – платежное поручение банку – товарно-транспортные накладные – акты освидетельствования работ».

В большинстве случаев успешному окончанию техпроцесса в срок предшествует повышенная на конечном этапе его выполнения напряженность как производственных сил, так и оперативного управления.

Математическая модель $N_{\text{оу_проц}}$, построенная на гипотезе, соотношении (1) и зависимости (3), в связи с необходимостью частых перерасчетов для оперативного координации решения производственных и обеспечивающих задач, должна функционировать в сети автоматизированных рабочих мест (АРМ) ключевых исполнителей ОСП и оперативного управления. Математическая модель должна быть снабжена интерфейсами и алгоритмами получения и обработки первичных данных, взятых из записей исполнителей, сделанных в рабочем порядке этапов решения их производственных задач. В свою очередь, записи выполняют в установленном формате, подлежащем автоматической обработке по алгоритмам модели. Такое применение математической модели позволит своевременно прогнозировать тенденцию (не)завершения техпроцессов в установленный срок, а также быстро локализовать причины вероятного срыва сроков, в том числе: «субподрядчики», «поставки», «собственная техническая и/или кадровая база», «инженерное сопровождение», «недостатки проектной документации», «предписания технадзора» и т.д. и принимать корректирующие меры, по необходимости. Сеть АРМ, построенная по модели (3)–(5), осуществляет алгоритмическую коммуникацию исполнителей и автоматически координирует принятие решений о способах, очередности и приоритетности решений текущих задач ОСП, которые являются основным содержанием аналитической части повседневной производственной и хозяйственной деятельности инженерно-технических работников строительных предприятий (СП).

Взаимодействие исполнителей организации и управления характеризуется следующими особенностями:

- меняющееся многообразие текущей потребности технологических процессов в ресурсах и стадиях удовлетворения этой потребности;
- меняющееся многообразие текущих ограничений организационного, технического и административно-правового характера в выполнении строительных и обеспечивающих процессов;
- рассредоточенность данных и исполнителей, случайный и неожиданный для отвечающего характер коммуникации, многообразие и противоречивость критериев и приоритетов оперативного управления, жесткий дефицит времени на принятие решений, запозывание и низкая проверяемость данных.

Учитывая эти обстоятельства, оперативная коммуникация не должна отвлекать смежных исполнителей от решения их производственных задач. Поэтому одним из интерфейсов модели напряженности должен быть доступ не к исполнителю, а к достоверному текущему результату этапа решаемой им задачи, позволяющему отстроить решение зависимых задач. Указанный интерфейс аналогичен структурированному (отфильтрованному) по производственным задачам чату хранимых форм рабочих записей. В этом случае личная коммуникация исполнителей минимальна, не приносит помех смежным исполнителям, доступна для анализа методами управления с целью совершенствования ОСП в основной период СМР.

Совместная информатизация ОСП и оперативного управления, т.е. координации и алгоритмизации решений задач и коммуникации исполнителей на основе математической модели $N_{\text{оу_проц}}$, должна исключать значимую роль системных администраторов и операторов ввода данных при ее эксплуатации в сети АРМ СП. Поэтому, учитывая небольшое число оперативных записей и невысокую скорость оборота документов в СП, специализированное программное обеспечение должно иметь простой и устойчивый к нештатным режимам оборота данных интерфейс и реализовывать логику порядка решения производственных задач всеми исполнителями и руководством СП. Структура хранения данных в сети АРМ также должна быть наглядной и основана на порядке решения производственных задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе гипотезы (1) и выражения (3) общий вид линейной зависимости $N_{\text{оу_проц}}$ от соотношения приведенных выше параметров будет иметь следующий вид:

$$N_{\text{оу_проц}} = \delta_{lim} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{\delta_{(VSTAT)i} \cdot \delta_{(VT)i}}{\delta_{(CONV)i}} \right), \quad (4)$$

где $N_{\text{оу_проц}}$ — напряженность оперативного управления текущими строительными процессами; δ_{lim} — показатель текущих вне- и внутриплощадочных

ограничений выполнения монтажно-укладочного техпроцесса; n — число ресурсов *текущей потребности* технологического процесса; δ_{Vstat} — показатель текущей заявленной потребности технологического процесса в ресурсе; δ_{VT} — показатель своевременности выполнения текущего монтажно-укладочного процесса; δ_{conv} — показатель обеспеченности заявленной потребности.

В показателе δ_{VT} реализована в явном виде зависимость напряженности оперативного управления от своевременности выполнения техпроцессов по графику — отношение конечно-разностных уравнений дат выполнения техпроцесса.

Оценка (вклад) в N_{oy_proc} скоординированности служб СП описывается показателями δ_{lim} , δ_{Vstat} , δ_{conv} . Эти показатели также имеют вид детерминированных соотношений, определенных на множестве допустимых значений параметров ОСП. В выражениях для других переменных (4) зависимость напряженности оперативного управления выражается через формальное числовое нормирование в диапазоне 0–1 линейных соотношений входящих в эти переменные параметров: удельные весовые коэффициенты значимости ограничений — для δ_{lim} , пропорциональные части заявленной текущей потребности в ресурсах актуального техпроцесса — для δ_{Vstat} и пошаговые счетчики преобразований состояния обеспеченности заявленными материально-техническими ресурсами — для δ_{conv} .

Так как объем статьи не позволяет в полном объеме представить и обосновать все показатели в выражении (4), рассмотрим наиболее сложный показатель своевременности выполнения техпроцесса δ_{VT} , содержащий конечно-разностное уравнение дат. На основе (1) в линейном приближении он описывается следующим выражением:

$$\delta_{VT} = \left(1 + \left| \frac{dat_{тек} - dat_{заявки}}{dat_{оконч} - dat_{заявки}} - \frac{V_{готов}}{V_{заявки}} \right| \right), \quad (5)$$

где $dat_{тек}$ — текущая дата; $dat_{заявки}$ — дата заявки текущей потребности в ресурсе; $dat_{оконч}$ — дата окончания монтажно-укладочного процесса по графику; $V_{готов}$ — объем ресурса текущей заявленной потребности, готовый к расходованию; $V_{заявки}$ — объем текущей заявленной потребности ресурса.

Область допустимых значений δ_{VT} : $1 \leq \delta_{VT} \leq 2$.

Конечные условия для δ_{VT} : при $V_{готов} = V_{заявки}$, $dat_{тек} = dat_{оконч}$.

При $dat_{заявки} = dat_{оконч}$, $dat_{заявки} - dat_{оконч} = 1$.

Слагаемое = 1 (методическая погрешность) введено для устранения значения функции $N_{oy_proc} = 0$ в случае действия других факторов напряженности.

Измеритель N_{oy_proc} имеет следующий вид:

$$\left[\frac{\text{число_информационных_преобразований_ресурсов}}{\text{оставшаяся_продолжительность_технологического_процесса_по_графику}} \right] = \left[\frac{\text{ед.}}{\text{день}} \right]. \quad (6)$$

На рис. 1, 2 показан интерфейс АРМ в режиме онлайн-оповещения ключевых сотрудников о текущих причинах и адресности повышенной напряженности оперативного управления, вызванных проблемами ОСП на объектах предприятия. Табличная часть интерфейса (рис. 2) автоматически заполняется актуальными детальными данными по алгоритму математической модели (4). Таблица доступна ключевым сотрудникам через сеть АРМ и показывает как причины и адресность текущих проблем организации выполнения технологических процессов на объектах предприятия, так и соответствующую им напряженность оперативного управления. Следует отметить, что напряженность оперативного управления характеризует в данном случае количество решаемых задач и скорость расстановки приоритетов ключевыми исполнителями.

На рис. 3 приведен график мониторинга отклонений N_{oy_proc} управления текущими технологическими процессами. Шкала относительных изменений напряженности оперативного управления, полученная в результате численного исследования минимаксных значений показателей, входящих в выражение (4), лежит в пределах от 0 (завершенный техпроцесс) до 30 (максимальные текущие ограничения выполнения техпроцесса). График на рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что выполнение техпроцесса 1 дезорганизовано, выполнение технологического процесса 2 находится в допустимых отклонениях по параметрам управления (в диапазоне значений от 6 (норма) до 12), а график техпроцесса 3 отражает идеальную организацию работ. Следует уточнить, что шкала изменений N_{oy_proc} в соответствии с моделью (4) характеризует относительное увеличение напряженности до 5 раз (в пиковые моменты производства). Характер нелинейности N_{oy_proc} может быть обоснован в дальнейших исследованиях, но при постоянном составе исполнителей увеличение их нагрузки в короткий период до 5 раз без потери качества работы представляется предельно допустимым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Система аналитических зависимостей значений параметров оперативного управления и параметров ОСП, интерпретируемая как «напряженность оперативного управления техпроцессами», представленная в виде (4) и (5), а также табличный интерфейс ее представления (рис. 1, 2) позволяют алгоритмизировать и цифровизировать координацию принятия решений ключевыми исполнителями ОСП и оперативного управления в строительном предприятии.

Автоматический пересчет по алгоритмам модели значений в таблице напряженности оперативно-

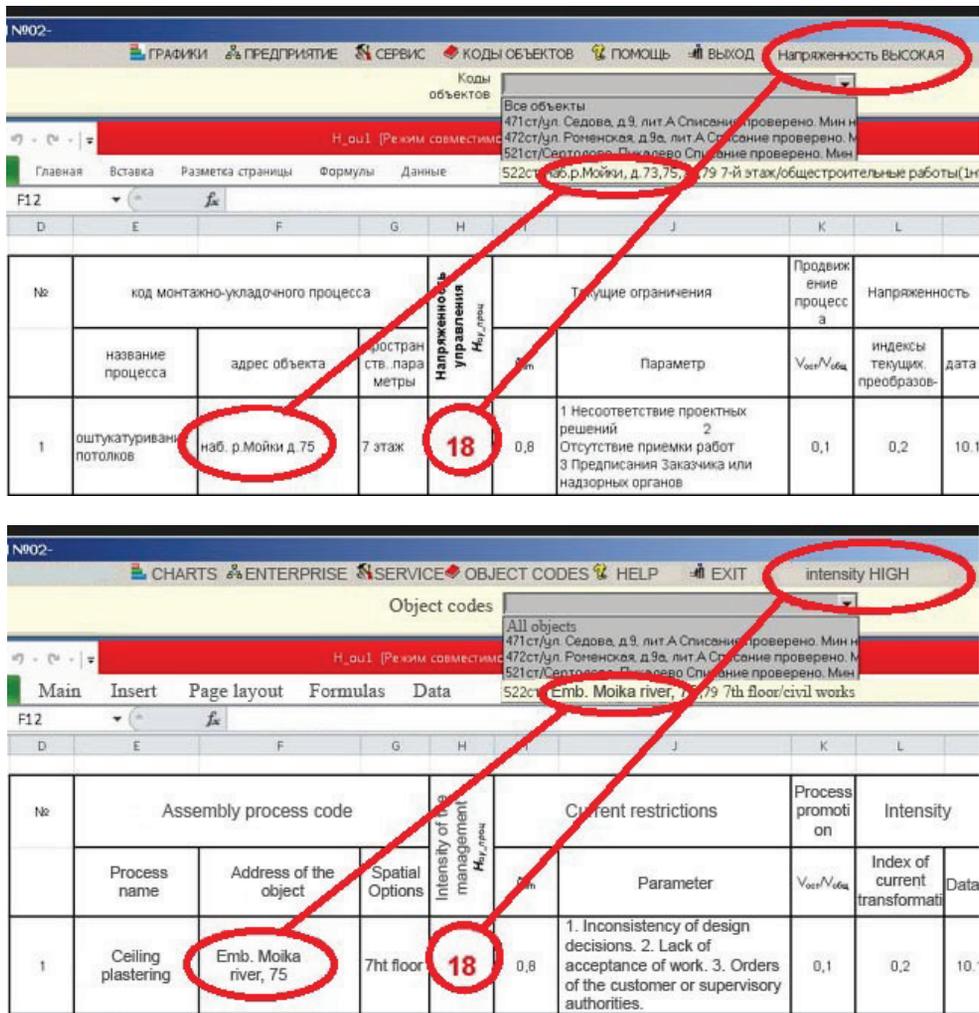


Рис. 1. Интерфейс АРМ в режиме организации и оперативного управления строительным производством

Fig. 1. AWS interface in the mode of organization and operational management of construction production

№	код монтажно-укладочного процесса			Напряженность управления $H_{упр,прое}$	Текущие ограничения		продвижение процесс		Напряженность ресурсного обеспечения			Своевременность обеспечения	
	название процесса	адрес объекта	пространств. параметры		δ_{lim}	Параметр	$V_{occ}/V_{обд}$	индексы текущих преобразов.	дата индекса	Наим. ресурса	δ_{VT}	$V_{зад}/V_{occ}$	
1	оштукатуривание потолков	наб. р. Мойки д.75	7 этаж	18	0,8	1 Несоответствие проектных решений 2 Отсутствие приемки работ 3 Предписания Заказчика или надзорных органов	0,1	0,2	10.12.2016	штукатуры-маляры 6 чел.	2	1	
2	устройство монолитного ж/б возстка	ул. Аккуратова д.6	(А-К: 1-8); - 2.500	6,43	0,2	1. неготовность фронта	0,75	0,4	12.12.2016	арматура А300 d16	1,5	0,7	

№	Assembly process code			Intensity of the management $H_{упр,прое}$	Current restrictions		Process promotion		The intensity of resource provision			Timeliness of resource provision	
	Process name	Address of the object	Spatial Options		δ_{lim}	Parameter	$V_{occ}/V_{обд}$	Index of current transformati	Index date	Resource name	δ_{VT}	$V_{зад}/V_{occ}$	
1	Ceiling plastering	Emb. Moika river, 75	7th floor	18	0,8	1. Inconsistency of design decisions. 2. Lack of acceptance of work. 3. Orders of the customer or supervisory authorities.	0,1	0,2	10.12.2016	Plasterer-painter, 6 persons	2	1	
2	Monolithic reinforced concrete grillage device	st. Akkuratova, 6	(A-K: 1-8); - 2.500	6,43	0,2	1. The unpreparedness of the front	0,75	0,4	12.12.2016	Reinforcing bars A300 d16	1,5	0,7	

Рис. 2. Табличная форма результата автоматической обработки рабочих оперативных записей исполнителей по алгоритмам математической модели (4)

Fig. 2. Tabular form of the result of automatic processing of working operational records of performers according to the algorithms of the mathematical model (4)

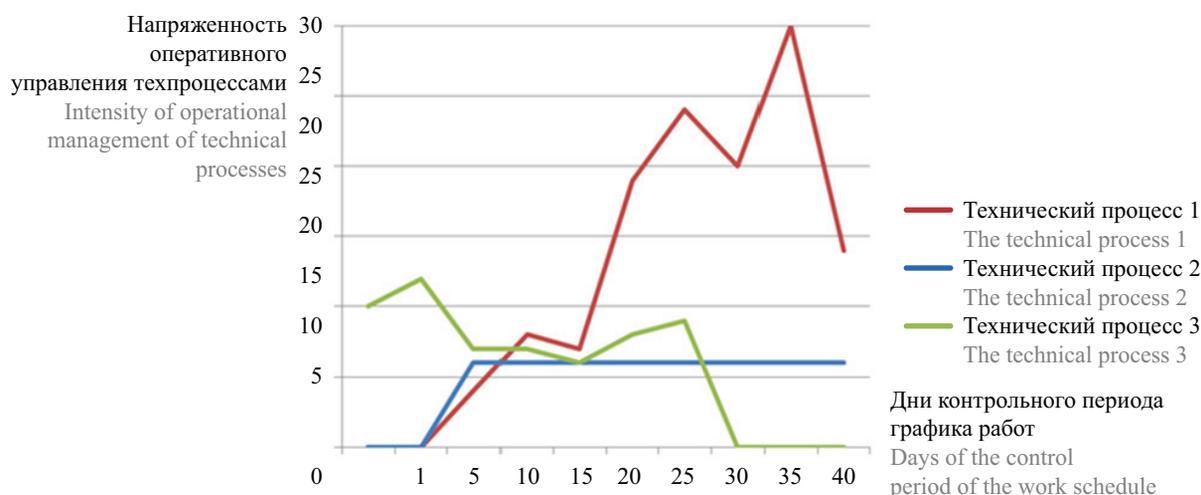


Рис. 3. Графическая форма интерфейса математической модели (2) в режиме АРМ «анализ эффективности ОСП на объекте за контрольный период»

Fig. 3. The graphical form of the interface of the mathematical model (2) in the AWS mode “analysis of the effectiveness of the OCP at the facility for the control period”

го управления, являющийся онлайн-мониторингом стадий решения задач и формирования производственных документов (в том числе и незавершенных: акты, рабочие заявки, корректировки графика и т.п.), синхронизированный с моментами доступа к таблице исполнителей и их руководителей, позволяет скоординировать их работу, а также своевременно обеспечивает оперативное управление необходимыми данными и исключает запаздывание и ошибки отчетности, а также затраты времени на ее выпуск.

Совместная информатизация ОСП и оперативного управления, построенная на алгоритмах мониторинга изменений оперативных рабочих записей исполнителей, координация решения производственных задач различными службами

и руководством, а также алгоритмизация коммуникации исполнителей по параметрам решаемых задач обеспечивают достоверное краткосрочное прогнозирование корректирующих воздействий для выдерживания графика работ по параметрам математической модели (4).

Алгоритмы, совместимые структуры данных и интерфейс в виде шаблонов исполнительских форм математической модели (4) напряженности оперативного управления выполнением технологического процесса в срок, установленный графиком работ, создают единую информационную среду организации строительного производства и оперативного управления, что повышает организационно-технологическую надежность строительного производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лapidус А.А. Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX.

2. Marcon P., Zezulka F., Vesely I., Szabo Z., Roubal Z., Sajdl O. et al. Communication Technology for Industry 4.0 // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS). 2017. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262021

3. Лapidус А.А., Мотылев Р.В., Сокольников В.В. Формирование методологии детерминированной модели организации строительного производства на основе концепции организационно-технологической платформы строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 116–131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY.

4. Соболев В.В. Информационное моделирование при разработке проектов организации строительства и проектов производства работ // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008. № S1. С. 31–35. EDN VSLIYL.

5. Болотин С.А., Дадар А.К.Х., Котовская М.А. Модель пространственно-временной аналогии в оптимизации последовательности реконструируемых объектов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 7 (42). С. 51–57. DOI: 10.5862/MCE.42.7. EDN RHAJKL.

6. Сокольников В.В. Совершенствование оперативного планирования строительного-монтажных работ и их ресурсного обеспечения на основе единой информационной среды управления : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 23 с.

7. Калачев В.Л., Керимов Ф.Ю., Акоюн А.Н. Методологические основы совершенствования организационно-технологических процессов качественной подготовки коммуникаций промышленных сооружений к эксплуатации // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2006. № 2. С. 82–84. EDN KBBADJ.
8. Легостаева О.А. Многофакторные модели для оценки инвестиционных проектов // Технология и экономика строительства. Проблемы и пути их решения : сб. науч. тр. 2004. С. 139–153.
9. Федосеева Т.А. Формирование функциональной модели организации строительного производства в условиях чрезвычайной ситуации // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 272–277. EDN RFXIBP.
10. Михайличенко О.Ю. Организационная надежность реализации строительных проектов // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2011. Т. 14. № 2 (51). С. 11–15. EDN UMNGXF.
11. Кузнецов П.А., Олейник С.П., Захаров П.В. Организационная надежность управления ресурсным обеспечением при переустройстве аварийных объектов // Жилищное строительство. 2006. № 1. С. 5. EDN KZBBCF.
12. Недавний О.И., Базилевич С.В., Кузнецов С.М. Оценка организационно-технологической надежности строительства объектов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 137–141. EDN RTJHHZ.
13. Абдуллаев Г.И., Величкин В.З., Солдатенко Т.Н. Повышение организационно-технологической надежности строительства линейно-протяженных сооружений методом прогнозирования отказов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3 (38). С. 43–50. DOI: 10.5862/MCE.38.6. EDN PZETTH.
14. Кузнецов С.М., Маслов И.А., Суворов А.Д., Ячменьков С.Н. Оценка надежности организационно-технологических решений в строительстве // Транспортное строительство. 2007. № 1. С. 26–27. EDN UWZCGJ.
15. Абдуллаев Г.И., Величкин В.З. Особенности оценки надежности строительных потоков // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 4 (6). С. 53–54. EDN NBMZFX.
16. Каракозова И.В., Павлов А.С. Создание сетевой модели на основе универсальной последовательности строительных работ // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. № 3. С. 1–16. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.3.1
17. Гусаков А.А., Гинзбург А.В., Веремеенко С.А., Монфред Ю.Б., Прыкин Б.В., Яровенко С.М. Организационно-технологическая надежность строительства. М. : А/О «Внешторгиздат», 1994. 472 с. EDN TOCFEF.
18. Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry // Engineering. 2017. Vol. 3. Issue 2. Pp. 154–160. DOI: 10.1016/J. ENG.2017.02.011
19. Hagiу A., Wright J. Multi-sided platforms // International Journal of Industrial Organization. 2015. Vol. 43. Pp. 162–174. DOI: 10.2139/ssrn.2794582
20. Сааму Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. М. : ЛКИ, 2008. 360 с.
21. Shaabany G., Grimm M., Anderl R. Secure information model for data marketplaces enabling global distributed manufacturing // Procedia CIRP. 2016. Vol. 50. Pp. 360–365. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.003
22. Atkinson R. Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria // International Journal of Project Management. 1999. Vol. 17. Issue 6. Pp. 337–342. DOI: 10.1016/s0263-7863(98)00069-6
23. Gil N., Tether B.S. Project risk management and design flexibility: Analysing a case and conditions of complementarity // Research Policy. 2011. Vol. 40. Issue 3. Pp. 415–428. DOI: 10.1016/j.respol.2010.10.011
24. Batson R. Project risk identification methods for construction planning and execution // Construction Research Congress 2009. 2009. DOI: 10.1061/41020(339)76
25. Anderson S., Molenaar K., Schexnayder C. Right-of-way methods and tools to control project cost escalation // NCHRP Synthesis 132, Transportation Research Board National Academies. 2009.
26. El-Rayes K., Moselhi O. Optimizing resource utilization for repetitive construction projects // Journal of Construction Engineering and Management. 2001. Vol. 127. Issue 1. Pp. 18–27. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:1(18)
27. Sokolnikov V., Osipenkova I., Stupakova O., Motylev R., Nurgalina R. Information models of structures and modeling in construction // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 09016. DOI: 10.1051/e3sconf/202127409016
28. Kuzhin M., Zhadanovsky B., Kudryashov M., Granilshchikova E. The organizational process in construction using information modeling technologies // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 08032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108032
29. Сокольников В.В. Математическая постановка задачи моделирования поточной организации работ в строительстве // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 3. С. 443–451. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.443-451. EDN ZQTLBY.
30. Сокольников В.В. Моделирование организации работ на основе концепции физического строительного потока // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 94–99. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-94-99. EDN KNHGMN.
31. Калюжнюк М.М., Сандан Р.Н. Структурная классификация элементов строительных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2008. № 1 (14). С. 46–52. EDN JVFRTN.
32. Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Организация строительных процессов: основы теории структурно-функционального моделирования // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 131–139. EDN TZHMMT.

Поступила в редакцию 26 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 21 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Вячеславович Сокольников — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС);** 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9; РИНЦ ID: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru;

Максим Виленнович Молодцов — кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры организации строительства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 8092-7416, Scopus: 57194618453, ResearcherID: D-7894-2018, ORCID: 0000-0003-4384-9330; molodcovmv@mail.ru.

Вклад авторов:

Сокольников В.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии и идеи.

Молодцов М.В. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Lapidus A.A. Organizational and technological platform of construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(4):516-524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX. (rus.).
2. Marcon P., Zezulka F., Vesely I., Szabo Z., Roubal Z., Sajdl O. et al. Communication Technology for Industry 4.0. *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*. 2017. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262021
3. Lapidus A.A., Motylev R.V., Sokolnikov V.V. Development of a methodology underlying a deterministic model of construction work arrangements on the basis of the concept of an organizational and technological platform for construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(1): 116-131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY. (rus.).
4. Sobolev V.V. Information modeling in the development of projects for the organization of construction and projects for the production of works. News of higher educational institutions. *North Caucasian region. Series: Engineering sciences*. 2008; S1:31-35. EDN VSLIYL. (rus.).
5. Bolotin S.A., Dadar A.Kh., Kotovskaya M. The model of the space-time analogy in the optimization of the renovation order of buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 7(42):51-57. DOI: 10.5862/MCE.42.7. EDN RHAJKL. (rus.).
6. Sokolnikov V.V. *Improving the operational planning of construction and installation works and their resource support on the basis of a unified management information environment : author. dis. ... cand. tech. sciences*. St. Petersburg, 2017; 23. (rus.).
7. Kalachev V.L., Kerimov F.Yu., Akopyan A.N. Methodological bases of improvement of organizational and technological processes of qualitative preparation of communications of industrial structures for operation. *Defense Industry Achievements — Russian Scientific and Technical Progress*. 2006; 2:82-84. EDN KBBADJ. (rus.).
8. Legostaeva O.A. Multifactor models for evaluation of investment projects. Technology and economics of construction. *Problems and ways to solve them. Inter-university collection of scientific papers*. 2004; 139-153. (rus.).
9. Fedoseeva T.A. Functional modeling of construction organization in emergency situations. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 10:272-277. EDN RFXIBP. (rus.).
10. Mikhailichenko O.Yu. Organizational reliability of the implementation of construction projects. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2011; 14(2):11-15. EDN UMGXF. (rus.).
11. Kuznetsov P.A., Oleinik S.P., Zakharov P.V. Organizational reliability of resource management during the reconstruction of emergency facilities. *Housing Construction*. 2006; 1:5. EDN KZBBCF. (rus.).
12. Nedavny O.I., Bazilevich S.V., Kuznetsov S.M. Assessment of organizational and technological reliability of project construction. *Systems. Methods. Technologies*. 2013; 2(18):137-141. EDN RTJHHZ. (rus.).
13. Abdullaev G.I., Velichkin V.Z., Soldatenko T.N. Improving the organizational and technological reliability of the construction of linear-extended structures by the method of predicting failures. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 3(38):43-50. DOI: 10.5862/MCE.38.6. EDN PZETTH. (rus.).
14. Kuznetsov S.M., Maslov I.A., Suvorov A.D., Yachmenkov S.N. Assessment of reliability of organizational and technological solutions in construction.

- Transport Construction*. 2007; 1:26-27. EDN UWZCGJ. (rus.).
15. Abdulayev G.I., Velichkin V.Z. Some features of reliability evaluation of building flows. *Magazine of Civil Engineering*. 2009; 4(6):53-54. EDN NBMZFX. (rus.).
16. Karakozova I.V., Pavlov A.S. Creation of a network model on the basis of a universal sequence of construction works. *Construction: Science and Education*. 2020; 10(3):1-16. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.3.1 (rus.).
17. Gusakov A.A., Ginzburg A.V., Veremeenko S.A., Monfred Yu.B., Prykin B.V., Yarovenko S.M. *Organizational and technological reliability of construction*. Moscow, A/O “Vneshtorgizdat”, 1994; 472. EDN TOCFEF (rus.).
18. Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry. *Engineering*. 2017; 3(2):154-160. DOI: 10.1016/J. ENG.2017.02.011
19. Hagi A., Wright J. Multi-sided platforms. *International Journal of Industrial Organization*. 2015; 43:162-174. DOI: 10.2139/ssrn.2794582
20. Saati T.L. *Decision making under dependencies and feedbacks: analytical networks*. Moscow, LKI, 2008; 360. (rus.).
21. Shaabany G., Grimm M., Anderl R. Secure information model for data marketplaces enabling global distributed manufacturing. *Procedia CIRP*. 2016; 50:360-365. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.003
22. Atkinson R. Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*. 1999; 17(6):337-342. DOI: 10.1016/s0263-7863(98)00069-6
23. Gil N., Tether B.S. Project risk management and design flexibility: Analysing a case and conditions of complementarity. *Research Policy*. 2011; 40(3):415-428. DOI: 10.1016/j.respol.2010.10.011
24. Batson R. Project risk identification methods for construction planning and execution. *Construction Research Congress 2009*. 2009. DOI: 10.1061/41020(339)76
25. Anderson S., Molenaar K., Schexnayder C. *Right-of-way methods and tools to control project cost escalation*. NCHRP Synthesis 132, Transportation Research Board National Academies. 2009.
26. El-Rayes K., Moselhi O. Optimizing resource utilization for repetitive construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2001; 127(1):18-27. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:1(18)
27. Sokolnikov V., Osipenkova I., Stupakova O., Motylev R., Nurgalina R. Information models of structures and modeling in construction. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:09016. DOI: 10.1051/e3sconf/202127409016
28. Kuzhin M., Zhadanovsky B., Kudryashov M., Granilshchikova E. The organizational process in construction using information modeling technologies. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:08032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108032
29. Sokolnikov V.V. Mathematical formulation of the problem of modeling the flow organization of works in construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(3):443-451. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.443-451. EDN ZQTLBY (rus.).
30. Sokolnikov V.V. Modeling of work organization based on the concept of physical construction stream. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 1(72):94-99. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-94-99. EDN KNHGMN (rus.).
31. Kalyuzhnyuk M.M., Sandan RN. Structural classification of elements of construction processes. *Bulletin of Civil Engineers*. 2008; 1(14):46-52. EDN JVFRTN (rus.).
32. Kalyuzhnyuk M.M., Kalyuzhnyuk A.V. Organization of construction processes: the fundamentals of the theory of structural and functional modeling. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 3(50):131-139. EDN TZHMMT (rus.).

Received June 26, 2023.

Adopted in revised form on March 17, 2024.

Approved for publication on March 21, 2024.

B I O N O T E S : **Vladimir V. Sokolnikov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; ID RSCI: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru;

Maksim V. Molodtsov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, senior lecturer of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeiskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 8092-7416, Scopus: 57194618453, ResearcherID: D-7894-2018, ORCID: 0000-0003-4384-9330; molodcovmv@mail.ru.

Contribution of the authors:

Vladimir V. Sokolnikov — scientific guidance, research concept, development of methodology and idea.

Maksim V. Molodtsov — collection of material, material processing, article writing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Блокчейн-транзакции как перспективный механизм обеспечения устойчивого развития строительного комплекса в условиях санкций (на примере экономики РФ)

Марат Рашитович Сафиуллин^{1,2}, Леонид Алексеевич Ельшин^{1,2},
Алия Айдаровна Динмухаметова^{1,2,3}, Азат Рафикович Шарапов⁴

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ); г. Казань, Россия;

² Центр перспективных экономических исследований Академии наук
Республики Татарстан (ЦПЭИ АН РТ); г. Казань, Россия;

³ Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ);
г. Казань, Россия;

⁴ Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма (ПГУ ФКСиТ);
г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Введенные странами Запада ограничения доступа финансовой системы России к международным клиринговым системам заметно усложняют процессы развития секторов экономики, глубоко интегрированных в международные цепочки поставок. Среди них необходимо выделить строительную отрасль, выступающую в роли «локомотива» развития многих других видов экономической деятельности. Обзору формирующихся макроэкономических эффектов в контексте нивелирования рисков динамики роста строительной отрасли РФ в рамках перехода национальной платежной системы на блокчейн (DLT) в условиях решения вопроса об импортозамещении посвящено настоящее исследование. Предметом исследования являются особенности перспектив устойчивого развития экономики РФ в условиях коррекции импорта стройматериалов.

Материалы и методы. Применены инструменты построения системы рекурсивных уравнений, оценивающих макроэкономические экстерналии в процессе имитационного моделирования использования блокчейна в системе обеспечения устойчивых расчетов с иностранными контрагентами, а также корреляционно-регрессионный анализ, формирующий основу для идентификации влияния строительной отрасли РФ на перспективы роста ВВП.

Результаты. Выявлен краткосрочный потенциал возможного замедления прироста ВВП России (–0,45 % в год) в рамках локализации поставок импорта строительных материалов. Обосновано, что нивелирование рисков ограничения поставок стройматериалов может быть обеспечено на основе внедрения в систему трансграничных платежей РФ блокчейн-технологий, формирующих новую основу для движения денежных потоков.

Выводы. Ценность полученных результатов исследования состоит в выявленных и эмпирически обоснованных рисках замедления развития строительной отрасли и национальной экономики РФ в целом в рамках возможной локализации поставок строительных материалов из-за рубежа в результате санкционного давления на финансовые рынки. Обосновано, что в качестве инструмента нивелирования рисков может выступить создание региональных в мировом масштабе блокчейн-платформ, обеспечивающих возможность устойчивости и независимости формирования транснациональных цепочек поставок от глобальных клиринговых сервисов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: блокчейн, транснациональные платежные системы, строительная отрасль, импортозамещение строительных материалов, экономические экстерналии, санкционное давление, международные цепочки поставок

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-00587, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сафиуллин М.Р., Ельшин Л.А., Динмухаметова А.А., Шарапов А.Р. Блокчейн-транзакции как перспективный механизм обеспечения устойчивого развития строительного комплекса в условиях санкций (на примере экономики РФ) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 1016–1030. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1016-1030

Автор, ответственный за переписку: Леонид Алексеевич Ельшин, Leonid.Elshin@tatar.ru.

Blockchain transactions as a promising mechanism to ensure sustainable development of the construction complex under sanctions (by the example of the Russian economy)

Marat R. Safullin^{1,2}, Leonid A. Elshin^{1,2}, Aliya A. Dinmukhametova^{1,2,3},
Azat R. Sharapov⁴

¹ Kazan (Volga Region) Federal University (KFU); Kazan, Russian Federation;

² Center of Advanced Economic Research in the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; Kazan,
Russian Federation;

³ Kazan National Research Technological University (KNRTU); Kazan, Russian Federation;

⁴ Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism; Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Restrictions imposed by Western countries on the access of the Russian financial system to international clearing systems significantly complicate the development of economic sectors that are deeply integrated into international supply chains. Among them, it is necessary to single out the construction industry, which acts as a “locomotive” for the development of many other types of economic activity. This paper is devoted to the review of emerging macroeconomic effects in the context of leveling the risks of the growth dynamics of the construction industry of the Russian Federation within the framework of the transition of the national payment system to blockchain (DLT) in the context of solving the issue of import substitution. The subject of the study is the features of the prospects for sustainable development of the Russian economy in the context of adjusting the import of construction materials.

Materials and methods. The tools of building a system of recursive equations estimating macroeconomic externalities in the process of simulation modelling of blockchain use in the system of ensuring sustainable settlements with foreign counterparties, as well as correlation and regression analysis, which forms the basis for identifying the impact of the Russian construction industry on the prospects for GDP growth were applied.

Results. The short-term potential of possible slowdown of Russia’s GDP growth (–0.45 % per year) as part of the localization of import supplies of building materials. It is substantiated that the risks of limiting the supply of building materials can be ensured through the introduction of blockchain technologies into the system of cross-border payments of the Russian Federation, which form a new basis for the movement of cash flows.

Conclusions. The value of the obtained research results consists in the identified and empirically substantiated risks of slowing down the development of the construction industry and the national economy of the Russian Federation as a whole within the framework of possible localization of supplies of building materials from abroad as a result of sanctions pressure on financial markets. It is substantiated that the creation of regional blockchain platforms on a global scale can act as a tool for leveling risks, providing the possibility of stability and independence of the formation of transnational supply chains from global clearing services.

KEYWORDS: blockchain, transnational payment systems, import substitution, economic externalities, sanctions pressure, international supply chains, sustainability of economic development

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-28-00587, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation.

FOR CITATION: Safullin M.R., Elshin L.A., Dinmukhametova A.A., Sharapov A.R. Blockchain transactions as a promising mechanism to ensure sustainable development of the construction complex under sanctions (by the example of the Russian economy). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):1016-1030. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1016-1030 (rus.).

Corresponding author: Leonid A. Elshin, Leonid.Elshin@tatar.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Сформировавшиеся условия развития национальной экономики РФ, характеризующиеся во многом наблюдаемыми процессами трансформации сложившихся цепочек добавленной стоимости в результате нарушения экспортных и импортных потоков в рамках санкционного противостояния, определяют поиск новых механизмов и направлений интенсификации экономического роста и нивелирования угроз в сфере ограничений экспортно-импортных операций. В этой связи, солидаризируясь с позицией ряда российских ученых и экспертов [1, 2], актуальными на повестке дня становятся вопросы нивелирования санкционных угроз. Следует при этом подчеркнуть, что особую роль в перечне обозначенных направлений стратегического развития играют вопросы поиска механизмов обеспечения устойчивости цепочек поставок в рамках внешнего по отношению к российской экономике контура. Несомненно, данная проблема является многоаспектной и включает широкий круг задач и направлений их ре-

шения: начиная от механизмов развития импортозамещения, смены географии поставок и заканчивая созданием альтернативных международных платежных систем, не контролируемых странами западного блока и не создающих угрозу давления на третьи страны, участвующие в реализации трансграничных платежей с РФ.

Особую важность вопросы создания альтернативных платежных систем наднационального уровня приобретают в условиях санкционных ограничений, вводимых отдельными странами по отношению к национальным экономическим системам. Так, усиленное в 2022 г. международное санкционное давление на национальную экономику РФ привело к ограничению доступа финансовой системы России к международным платежным системам. К примеру, крупнейшие банки РФ (Сбербанк, ВТБ, Банк «Открытие», ВЭБ.РФ, Московский кредитный банк, Россельхозбанк и др.) и корпорации 3 июня 2022 г. были отключены от SWIFT, что привело к усложнению процессов реализации международ-

ных финансовых транзакций из России и в Россию. Остроту проблеме придает то, что по данным за 2021 г. около 300 российских финансовых организаций использовали систему SWIFT. По этому показателю РФ занимала второе место в мире после США. Несложно представить масштаб последствий для российской экономики в результате отключения от этого сервиса обработки данных и передачи финансовых сообщений. Отключение финансовых учреждений от SWIFT предполагает то, что потенциал реализации ими платежных транзакций и валютных операций существенно ограничивается, что отражается на движении внешнеторгового оборота и нарушении устойчивости цепочек поставок.

Вопросы об альтернативных механизмах организации международных цепочек поставок и сопровождающих их трансграничных транзакций стоят достаточно остро на повестке текущего дня для российской экономики. Особую значимость они приобретают для видов экономической деятельности, активно интегрированных в цепочки поставок импорта сырья и материалов, обеспечивающих ритмичность хозяйственных процессов. Несомненно, строительная отрасль относится к такой сфере деятельности.

По данным за 2020 г. в Россию ввезено из-за рубежа строительных материалов на сумму около 2,8 млрд долл. США (рис. 1). При этом динамика роста импорта в секторе экономики РФ «Строительство» имеет в целом восходящий вектор, несмотря на интенсивные попытки государства преломить этот тренд и выйти на устойчивую траекторию импортозамещения в данном виде экономической деятельности.

Учитывая повышенный уровень востребованности исследований в сфере поиска наиболее устойчивых моделей экономического роста как на макро-, так и на секторальном уровне, работы, направленные на поиск и обоснование механизмов реализации политики импортозамещения, начали появлять-

ся все чаще. Некоторые из них представлены ниже. Прежде чем представить обзор сложившихся подходов к поставленной в настоящем проекте проблеме, следует отметить ограниченный спектр работ, которые бы в качестве предмета исследования использовали не только теоретическое обоснование вопроса, но и в качестве инструментария применяли методы формализованного анализа, сценарного моделирования и прогнозирования возможных эффектов.

Обращаясь к наиболее ярким работам в этой сфере, необходимо выделить исследования российских ученых, представленных ниже.

А.Г. Зельднер в своем исследовании [2] сосредотачивает внимание в рамках изучения перспектив политики импортозамещения в национальной экономике России на оценках последствий, выраженных в санкционном противостоянии РФ со странами Запада.

В.В. Попов [2] с помощью применения функционала пакета Statistica получил эконометрические модели, результаты оценивания параметров которых позволили получить оценки влияния взаимной торговли Республики Казахстан и Республики Беларусь на экономический потенциал РФ. По результатам исследования автор доказал, что на внешнюю торговлю РФ, во многом являющуюся показателем развития ее экономического потенциала, большее влияние имеют взаимоотношения со странами ЕАЭС.

Автор труда А.П. Цыпин [2] предложил концептуальную схему выявления (мониторинга) рисков субъектов, которые с высокой долей вероятности столкнутся (если уже не столкнулись) с проблемой снижения экономического потенциала, следовательно, потерей инвестиционной привлекательности и, как следствие, утратой перспектив дальнейшего развития в зависимости от изменения структуры товаропотоков.

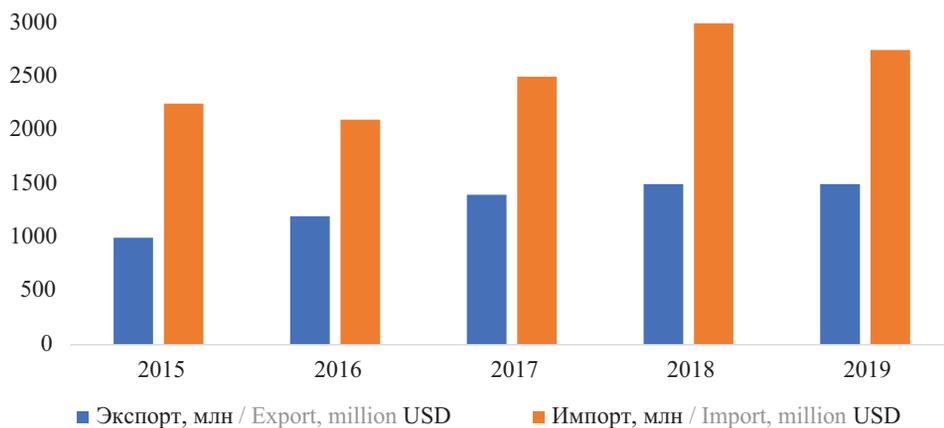


Рис. 1. Объем импорта строительных материалов в РФ¹

Fig. 1. Import volume of building materials in the Russian Federation¹

¹ Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru>

Н.А. Невская в публикации «Формирование системы мер экономической политики» [2] обосновывает позицию, в соответствии с которой формирование системы мер экономической политики, направленной на максимизацию импортозамещения, является объективной необходимостью.

Важно также отметить и то, что вопросам теоретического и прикладного осмысления и исследования политики импортозамещения и формирования устойчивых кооперационных связей, мало подверженных мировой конъюнктуре, уделяется значительное внимание в последние годы и среди зарубежных исследователей. К наиболее заметным из них следует отнести публикации [3–5].

Необходимо подчеркнуть, что в качестве одной из основных идей нивелирования рисков возможного нарушения международных цепочек поставок, а следовательно, и обеспечения устойчивого развития национальных экономических систем, рассматриваемой и тщательно изучаемой современными исследователями и различными международными организациями, сегодня выступает переход на децентрализованные платформы и торговые площадки [4, 6, 7]. Его суть заключается в том, чтобы заменить устоявшиеся форматы развития торговых площадок электронной коммерции с множеством посредников (финансовых, страховых, логистических и др.) на децентрализованный формат, связывающий напрямую покупателей и продавцов (применительно к объекту настоящего исследования — экспортеров и импортеров) в соответствии с принципами создания и развития одноранговой, децентрализованной сети на базе блокчейна, обеспечивающей нацио-

нальный суверенитет. В этой связи в последнее время как среди российских, так и зарубежных ученых все чаще стали проявляться стремления к исследованию данного вопроса [5, 8].

Опираясь на представленные выше аргументы, а также руководствуясь целью исследования, выраженной в поиске макроэкономических экстерналий для экономики РФ в рамках нивелирования угроз нарушения устойчивых каналов поставок импорта стройматериалов в результате разрушения механизмов реализации финансовых транзакций с иностранными поставщиками, ключевыми задачами исследования являются:

- разработка методических подходов к оценке перспектив применения альтернативных платежных систем транснационального уровня в строительном секторе экономики РФ;
- построение прогноза динамики ВВП России вследствие нарушения внешнеэкономических денежных потоков и, соответственно, коррекции поставок строительных материалов с последующим замедлением развития строительной отрасли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прежде чем перейти к процессам конструирования моделей, направленных на поиск решений поставленных задач, важно рассмотреть главные тенденции, раскрывающие особенности формирования внешнеэкономических денежных потоков применительно к экономике РФ и выявить на этой основе ключевые тренды (рис. 2).

В целом результаты дескриптивного экспресс-анализа свидетельствуют о наличии значительных

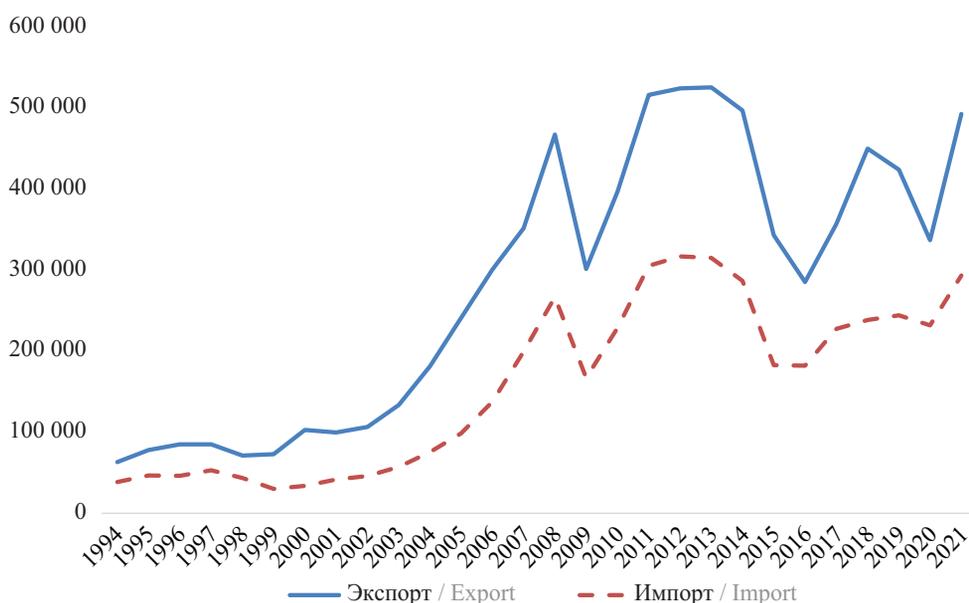


Рис. 2. Динамика экспорта и импорта, млн долл. США²

Fig. 2. Dynamics of exports and imports, mln USD²

² ФТС России. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/94itog.xls>

Табл. 1. Доля импорта в экономике РФ, в % ВВП, 2010–2022 гг. (рассчитано авторами по данным ЕМИСС)¹

Table 1. The share of imports in the Russian economy, in % of GDP, 2010–2022¹

2010	2015	2021
21,1	20,6	21,3

объемов трансграничных денежных потоков в экономике РФ, что, с одной стороны, свидетельствует о высоком уровне интеграции экономики России в глобальную экономическую среду, а с другой — о наличии высокого уровня зависимости национальной экономической системы от возможных пертурбаций в сфере доступа к международным клиринговым сервисам и формированию трансграничных цепочек поставок.

Любые нарушения устоявшихся внешних связей могут повлечь за собой негативные последствия, что особенно актуально в условиях существенной зависимости экономики РФ от импорта, доля которого в национальной экономике России составляет около 21 % ВВП (табл. 1). В этой связи происходящие изменения в объемах внешнеэкономических денежных потоков (вызванных, в том числе, санкционными ограничениями, нарушение которых влечет для третьих стран негативные последствия), могут нарушить уклад и динамику формирования экономического роста как на макроэкономическом, так и на секторальном уровне. С целью нивелирования подобных рисков представляется целесообразным оценить возможные последствия и предложить механизмы, обеспечивающие локализацию рассматриваемых угроз с целью сохранения устойчивых каналов поставки импортных комплектующих, сырья, готовой продукции.

Решение поставленной задачи целесообразно реализовать в рамках поиска ответов на два ключевых вопроса. Первый из них направлен на поиск закономерностей, раскрывающих искомые взаимосвязи между ВВП РФ и динамикой изменения транснациональных денежных потоков, в том числе и в рамках строительной отрасли. Второй — на разработку возможных направлений, нивелирующих угрозы устойчивого развития и нарушения международных цепочек поставок. Придерживаясь данной методологической концепции исследования, далее представлены методические подходы к реализации поставленных целей.

Для исследования зависимости ВВП от входящих денежных потоков транснационального уровня предложена система рекурсивных уравнений.

В структурном виде модель выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} y_1 = a_{01} + a_{11}x_1 + b_{12}y_2 + \varepsilon_1; \\ y_2 = a_{02} + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \varepsilon_2; \\ y_3 = a_{03} + b_{31}y_1 + a_{32}x_3 + \varepsilon_3, \end{cases}$$

где y_1 — входящий денежный поток; y_2 — индекс потребительских цен; y_3 — валовой внутренний

продукт; a_{01}, a_{02}, a_{03} — свободные члены; x_1 — затраты на цифровые технологии; x_2 — чистый экспорт; x_3 — курс доллара.

Таким образом, в модели в качестве эндогенных (зависимых) выступают следующие показатели: входящий денежный поток, индекс потребительских цен, валовой внутренний продукт. В качестве предопределенных (независимых) — затраты на цифровые технологии, индекс потребительских цен, чистый экспорт, курс доллара.

Как правило, применение МНК (метода наименьших квадратов) для оценивания параметров структурной модели дает несостоятельные и смещенные оценки, поэтому систему уравнений необходимо привести к приведенной форме. В рамках настоящего исследования приведенная форма примет следующий вид:

$$\begin{cases} y_1 = A_{11}x_1 + A_{12}y_2 + A_{13}x_2 + A_{14}x_3 + A_{15}y_1; \\ y_2 = A_{21}x_1 + A_{22}y_2 + A_{23}x_2 + A_{24}x_3 + A_{25}y_1; \\ y_3 = A_{31}x_1 + A_{32}y_2 + A_{33}x_2 + A_{34}x_3 + A_{35}y_1. \end{cases}$$

При переходе от приведенной формы модели к структурной важно проверить условие идентификации — единственности соответствия между приведенной и структурной формами модели.

Возможны следующие ситуации.

1. Структурные коэффициенты однозначно выражаются через коэффициенты приведенной формы модели. В этом случае структурную модель называют точно идентифицируемой.

2. Некоторые из структурных коэффициентов не выражаются через коэффициенты приведенной формы модели. Такую структурную модель называют неидентифицируемой.

3. Структурные коэффициенты неоднозначно выражаются через коэффициенты приведенной формы модели. Тогда структурную модель называют сверхидентифицируемой.

Необходимое условие идентификации. Пусть K — число не включенных в уравнение, но присутствующих в системе экзогенных переменных; M — число включенных в уравнение эндогенных переменных. Если выполнено условие: $K \geq M - 1$, то уравнение в структурной модели может быть идентифицировано.

Придерживаясь данных методических принципов, реализовано построение системы уравнений и проведена оценка проверки необходимых условий идентификации построенной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках использования предложенного методического инструментария получена следующая система уравнений, раскрывающая особенности и закономерности между исследуемыми факторами:

$$\begin{cases} y_1 = 24\,497,3 + 0,0013x_1 - 176,76y_2; \\ y_2 = 112,24 - 0,0009x_2 + 0,034x_3; \\ y_3 = 5\,031\,662 + 5826,77y_1 + 2,68x_3. \end{cases}$$

Модель включает $K = 3$ (эндогенные) переменные (y_1, y_2, y_3) и $M = 5$ предопределенные (экзогенные) переменные (x_1, y_2, x_2, x_3, y_1):

$$K - 1 = 2; K + M = 8.$$

Уравнение № 1:

$$y_1 = 24\,497,3 + 0,0013x_1 - 176,76y_2.$$

Это уравнение включает 1 эндогенную переменную (y_1), т.е. $k_1 = 1$ и 2 предопределенные переменные (x_1, y_2), т.е. $m_1 = 2$.

$M - m_1 = 3 > k_1 - 1 = 0$, то уравнение сверхидентифицируемо (при выполнении достаточных условий идентификации).

Уравнение № 2:

$$y_2 = 112,24 - 0,0009x_2 + 0,034x_3.$$

Это уравнение включает 1 эндогенную переменную (y_2), т.е. $k_2 = 1$ и 2 предопределенные переменные (x_2, x_3), т.е. $m_2 = 2$.

$M - m_2 = 3 > k_2 - 1 = 0$, то уравнение сверхидентифицируемо (при выполнении достаточных условий идентификации).

Уравнение № 3:

$$y_3 = 5\,031\,662 + 5826,77y_1 + 2,68x_3.$$

Это уравнение включает 1 эндогенную переменную (y_3), т.е. $k_3 = 1$ и 2 предопределенные переменные (x_3, y_1), т.е. $m_3 = 2$.

$M - m_3 = 3 > k_3 - 1 = 0$, то уравнение сверхидентифицируемо (при выполнении достаточных условий идентификации).

По итогам проведенного анализа в табл. 2 представлена систематизация полученных оценок.

Далее, согласно базовым принципам эконометрического анализа, реализован анализ на предмет достаточных условий идентификации полученной модели (системы уравнений). Решение этой задачи целесообразно провести на основе анализа достаточных условий идентификации для каждого уравнения системы. Для того чтобы они выпол-

нялись, необходимо, чтобы определитель матрицы A (матрицы коэффициентов при переменных, не входящих в это уравнение) был равен $K - 1 = 2$. Результаты данного анализа представлены в табл. 3–5.

Ее ранг равен 2, следовательно, $\det A \neq 0$.

Достаточное условие идентификации для уравнения № 1 выполняется ($K - 1 = 2$).

Ее ранг равен 2, следовательно, $\det A \neq 0$.

Достаточное условие идентификации для уравнения № 2 выполняется ($K - 1 = 2$).

Ее ранг равен 2, следовательно, $\det A \neq 0$.

Достаточное условие идентификации для уравнения № 3 выполняется ($K - 1 = 2$).

Таким образом, каждое из уравнений системы является сверхидентифицируемым, следовательно, система сверхидентифицируемая.

Для решения системы применен двухшаговый МНК, так как использование косвенного МНК (КМНК) не даст однозначных оценок для сверхидентифицируемой системы.

По результатам расчетов получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = 0,04x_1 - 145,79y_2; \\ y_2 = -0,0125x_2 + 0,084x_3; \\ y_3 = 6025,8y_1 + 3,15x_3. \end{cases}$$

Следуя принципам и подходам предложенного методического инструментария, а также опираясь на методы имитационного моделирования исследуемых процессов, в табл. 6 представлены прогностические оценки прироста валового внутреннего продукта РФ в рамках интенсификации деловой активности и соответствующего изменения транснациональных денежных потоков.

Полученные оценки, характеризующие потенциал прироста валового внутреннего продукта РФ ввиду нарушения внешнеэкономических денежных потоков и, соответственно, товарооборота, свидетельствуют о весьма высоком уровне зависимости национальной экономики от изменения их объемов.

Табл. 2. Матрица коэффициентов при переменных модели

Table 2. Matrix of coefficients for model variables

Номер уравнения Equation	y_1	y_2	y_3	x_1	y_2	x_2	x_3	y_1
1	-1	0	0	0,0013	-176,76	0	0	0
2	0	-1	0	0	0	-0,0009	0,034	0
3	0	0	-1	0	0	0	2,68	5826,77

Табл. 3. Матрица коэффициентов при переменных, не входящих в уравнение (1) (рассчитано авторами)

Table 3. Matrix of coefficients for variables not included in Equation (1)

-1	0	-0,0009	0,034	0
0	-1	0	2,68	5826,77

Табл. 4. Матрица коэффициентов при переменных, не входящих в уравнение (2) (рассчитано авторами)

Table 4. Matrix of coefficients for variables not included in Equation (2)

-1	0	0,0013	-176,76	0
0	-1	0	0	5826,77

Табл. 5. Матрица коэффициентов при переменных, не входящих в уравнение (3) (рассчитано авторами)

Table 5. Matrix of coefficients for variables not included in Equation (3)

-1	0	0,0013	-176,76	0
0	-1	0	0	-0,0009

Следуя представленным в табл. 6 данным, изменение на 1 % объемов транснациональных денежных потоков формирует потенциал коррекции ВВП на 0,45 % и наоборот. В этой связи любые корректировки в международных цепочках поставок в РФ чувствительным образом будут отражаться на перспективах устойчивого развития национальной экономической системы и ее отдельных секторов в частности.

Экстраполируя полученные результаты на строительную отрасль России (где объемы денежных потоков, сопровождающих импорт строительных материалов оценивались до 2022 г. на уровне 2,5–3,0 млрд долл. США, что примерно соответствует 1 % от импорта в РФ в целом (рис. 1)), локализация зарубежных поставок стройматериалов (крайне пессимистический сценарий) формирует потенциал снижения темпов роста ВВП на 0,45 % (табл. 6). Следует при этом констатировать, что полученный результат может свидетельствовать только об оперативных для российской экономики последствиях. Несомненно, строительная индустрия является «локомотивом» экономического роста для многих других секторов национальной экономики, определяя устойчивость и перспективы их развития (табл. 7). Замедление динамики роста строительного комплекса, в том числе и в рамках масштабного ограничения поставок импорта, в средне- и долгосрочной перспективе потенциально может привести к более заметным темпам снижения ВВП.

Учитывая наличие введенных по отношению к экономике РФ санкций, следует констатировать о необходимости поиска механизмов нивелирования угроз замедления импорта строительных материалов, в первую очередь в рамках внешнего давле-

ния, ограничивающего международные транзакции. Несомненно, данная задача является не простой. На сегодняшний момент экспертами и учеными называются разные механизмы ее решения: начиная от переориентации цепочек поставок с Запада на Восток и заканчивая направлениями интенсификации научно-технологического развития с целью активизации процессов импортозамещения. Между тем из исследовательского фокуса выпадают такие аспекты, имеющие существенный потенциал решения рассматриваемой проблемы, как создание альтернативных каналов и шлюзов, обеспечивающих трансграничные платежи, минуя санкционные ограничения доступа к международным клиринговым сервисам. К ним следует отнести блокчейн-платформы, реализующие функционал обеспечения транснациональных платежей.

Рынок блокчейн-технологий и основанные на них бизнес-операции, включающие и финансовые транзакции, динамично развиваются в мире. Экономические отношения, построенные с использованием цифровых денег, с каждым годом все глубже интегрируются в систему хозяйственных отношений [8, 9–14]. Во многом это обусловлено тем, что блокчейн служит эффективным инструментом устранения сложившихся в международной практике недостатков в сфере осуществления межбанковских платежей и сопутствующих для мировой торговли процессов. С определенной долей уверенности можно утверждать, что блокчейн — это альтернативный традиционным банковским методам механизм обеспечения трансграничных и внутринациональных транзакций. Технология создает основу для дешевой и безопасной альтернативы формирования международных платежных систем, оптимизируя трансграничный процесс обеспечения цепочек поставок, сохраняя при этом высочайший уровень безопасности международных финансовых переводов в рамках реализации защищенного распределенного реестра, ограничивающего несанкционированный доступ к финансовым операциям (5, 11, 15–17).

Актуализирует вопрос о перспективах и порождаемых эффектах в процессе трансформации

Табл. 6. Имитационное моделирование прироста ВВП вследствие интенсификации деловой активности и соответствующего изменения транснациональных денежных потоков (по данным за 2021 г.) (рассчитано авторами)

Table 6. Simulation modelling of GDP growth due to the intensification of business activity and the corresponding change in transnational cash flows (according to data for 2021)

Номер Number	Темпы прироста агрегированного значения объемов трансграничных денежных потоков, % Growth rates of the aggregate value of cross-border cash flows, %	Прирост ВВП, % GDP growth, %
1	Текущее значение Present value	–
2	+1,0	+0,45
3	+3,0	+1,34
4	+5,0	+2,24

Табл. 7. Корреляционный анализ взаимосвязи строительной отрасли в РФ с иными видами экономической деятельности (рассчитано авторами по данным Федеральной службы государственной статистики)³

Table 7. Correlation analysis of the relationship between the construction industry in the Russian Federation and other types of economic activity³

Отрасли Industries	Строительство Construction	Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство / Agriculture, forestry, hunting, fishing and fish farming	Добыча полезных ископаемых Mining	Обрабатывающие производства Manufacturing industries	Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха Provision of electricity, gas and steam; air conditioning	Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles	Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания Activities of hotels and catering establishments	Деятельность финансовая и страховая Financial and insurance activities	Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение / Public administration and military security; social security	Образование Education	Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг Activities in the field of health and social services
Строительство Construction	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство Agriculture, forestry, hunting, fishing and fish farming	0,40	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Добыча полезных ископаемых Mining	-0,68	-0,61	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Обрабатывающие производства Manufacturing industries	0,66	0,18	-0,47	1,00	-	-	-	-	-	-	-
Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха Provision of electricity, gas and steam; air conditioning	0,74	0,07	-0,56	0,28	1,00	-	-	-	-	-	-
Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles	0,90	0,45	-0,82	0,49	0,80	1,00	-	-	-	-	-
Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания Activities of hotels and catering establishments	0,62	0,13	-0,36	-0,17	0,67	0,60	1,00	-	-	-	-

Окончание табл. 7 // End of the Table 7

Отрасли Industries	Строитель- ство Con- struction	Сельское, лесное хозяй- ство, охота, рыболовство и рыболовство / Agriculture, forestry, hunting, fishing and fish farming	Добыча по- лезных ископа- емых Mining	Обраба- тывающие производ- ства Manu- facturing industries	Обеспечение электриче- ской энер- гией, газом и паром; кон- дициониро- вание возду- ха Provision of electricity, gas and steam; air conditioning	Торговля оптовая и роз- ничная; ремонт автотранспорт- ных средств и мотоциклов Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles	Деятельность гостиниц и предпри- ятий обще- ственного питания Activities of hotels and catering establishments	Деятель- ность фи- нансовая и страховая Financial and insurance activities	Государственное управление и обе- спечение военной безопасности; социальное обе- спечение / Public administration and military security; social security	Образова- ние Educa- tion	Деятельность в области здраво- охранения и со- циальных услуг Activities in the field of health and social services
Деятельность финансовая и страховая Financial and insurance activities	0,24	0,06	-0,29	-0,02	0,62	0,34	0,28	1,00	-	-	-
Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение Public administration and military security; social security	-0,56	-0,11	0,13	-0,38	-0,72	-0,59	-0,42	-0,34	1,00	-	-
Образование Education	0,28	0,57	-0,69	0,37	0,01	0,42	0,06	-0,37	0,18	1,00	-
Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг Activities in the field of health and social services	-0,33	0,18	-0,31	0,16	-0,20	-0,05	-0,31	-0,10	0,40	0,66	1,00

³ О производстве и использовании валового внутреннего продукта (ВВП) в 2022 году // Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/55_07-04-2023.html

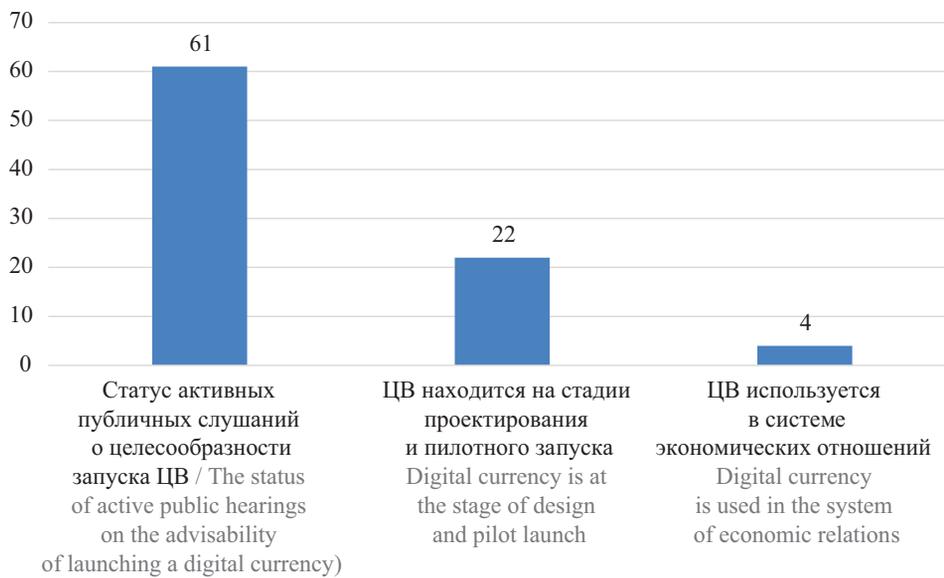


Рис. 3. Текущий статус запуска ЦВ (разработано по данным работы [19])

Fig. 3. Current status of DC launch (developed according to [19])

национальной платежной системы в рамках перехода на блокчейн и обостряющаяся международная обстановка, следствием которой становится для РФ возрастающее санкционное давление и ограничения к доступу международных клиринговых компаний, платежных систем, отключение финансовых организаций РФ от системы SWIFT и т.п. В этих условиях новой реальности задача интенсификации и поиска альтернативных каналов организации международных и национальных транзакций приобретает стратегический смысл. Возможность и потенциал замещения зарубежных технологических решений отечественными разработками определяет не только глобальную конкурентоспособность России, но и формирует задел на обеспечение устойчивости развития ее национальной финансовой системы, интенсификацию процессов социально-экономического развития с учетом имеющихся ограничений.

Важна и целесообразность построения новых каналов обеспечения трансграничных платежей, и то, что экономические отношения, построенные с использованием блокчейна и цифровых валют (ЦВ), с каждым годом все глубже интегрируются в систему хозяйственных отношений в мире. Опрос Банка международных расчетов (БМР) [18] свидетельствует о том, что большинство центральных банков реализуют собственные исследования и находятся на различных этапах оценки перспектив введения ЦВ в обращение [19]. В частности, возможности выпуска ЦВ в обращение изучают 86 % центральных банков, 60 % экспериментируют с технологиями, 14 % находятся в стадии прикладной разработки или пилотирования [19]. Активную позицию в данном вопросе занимают Европейский центральный банк, Банк Швеции, Банк Канады, Банк России, Банк Англии, Резервный банк Австралии, Народный банк Китая. Отмеченные регуляторы

рассматривают ЦВ как «новую форму фиатных денег, выпущенных в цифровой форме центральным банком и являющихся законным платежным средством» [20].

По оценкам БМР [19] к 2026 г. более 20 % центральных регуляторов в мире запустят в обращение ЦВ. В соответствии с представленными данными² на начало 2023 г. 87 стран находятся в стадии активной проработки и обсуждения запуска цифровых валют в экономический оборот (рис. 3). При этом количество стран, уже применяющих в системе экономических отношений ЦВ, пока что на порядок меньше, чем стран, находящихся на этапе обсуждения и пилотного запуска ЦВ в хозяйственный оборот.

Актуализируя значение и роль блокчейна и построенных на его основе платежных систем, в том числе трансграничного уровня, необходимо отметить, что, несмотря на противоречивые подходы и позиции экспертов к целесообразности и возможности их использования в хозяйственной деятельности, отдельные государства и экономические субъекты уже активно идут и развиваются по пути «блокчейнизации» процесса организации международных цепочек поставок (табл. 8).

Интенсификация распространения и интеграции блокчейна в хозяйственную среду, в том числе и в международную торговлю, во многом обусловлены тем, что данные технологии облегчают процесс выстраивания экономических отношений между сторонами — участниками международной сделки.

Повышает «градус» актуальности применения блокчейна в системе организации трансграничных платежей, в том числе и с целью обеспечения устойчивости процесса международных цепочек поставок, уже упомянутые выше санкции, ограничивающие потенциал внешнеэкономических операций.

Табл. 8. Практика применения блокчейна экосистем в системе организации цепочек поставок в международной торговле (разработано по данным публикаций [20, 21])

Table 8. The practice of using blockchain ecosystems in the system of organizing supply chains in international trade [20, 21]

Организации-партнеры Partner organizations	Функционал и предназначение системы Functionality and purpose of the system	Дата запуска проекта Project start date
<p>Банки Канады, Сингапура JP Morgan (Американский банк, многонациональный финансовый холдинг) Banks of Canada, Singapore JP Morgan (American bank, multinational financial holding)</p>	<p>Реализация финансовых трансграничных операций с использованием ЦВ в целях ускорения транзакционных процедур, их удешевления и повышения уровня безопасности в рамках использования блокчейна Implementation of financial cross-border transactions using digital currencies in order to speed up transactional procedures, reduce their cost and increase the level of security within the framework of the use of blockchain</p>	<p>2019</p>
<p>KlickEx совместно с Stellar.org и блокчейн IBM KlickEx — денежная платежная система Центрального банка Полинезии с использованием межбанковской розничной системы Smart market. KlickEx in partnership with Stellar.org and IBM Blockchain. KlickEx is a cash payment system of the Central Bank of Polynesia using the Smart market inter-bank retail system</p>	<p>Использование блокчейн-платформ для денежных переводов Using blockchain platforms for money transfers</p>	<p>2017</p>
<p>Circle — технологическая компания по одноранговым платежам, которая в настоящее время управляет популярной стабильной монетой USDC, криптовалютой, стоимость которой привязана к доллару США Circle is a peer-to-peer payment technology company that currently operates the popular USDC stablecoin, a cryptocurrency pegged to the US dollar</p>	<p>Мгновенные трансграничные транзакции в формате P2P-платежей без комиссии на базе блокчейна Ethereum Instant cross-border transactions in the form of P2P payments without commission based on the Ethereum blockchain</p>	<p>2017</p>
<p>ReiseBank (Германия) и (ABT) Канада ReiseBank (Germany) and (ABT) Canada</p>	<p>Банки используют блокчейн Ripple для организации и проведения международных платежей. Блокчейн-платформа предоставляет финансовым организациям обрабатывать трансграничные транзакции мгновенно и без комиссий Banks use the Ripple blockchain to organize and conduct international payments. The blockchain platform enables financial institutions to process cross-border transactions instantly and without commissions</p>	<p>2016</p>

Необходимо отметить, что экономика России весьма эффективно нивелировала угрозы со стороны западных санкций в сфере давления на национальную платежную систему. Создание собственных систем передачи финансовых сообщений (СПФС), позволяющих сформировать автономные от международных платежных систем механизмы обработки финансовых транзакций внутри страны, создание суверенных механизмов межбанковского взаимодействия, устойчивое функционирование национальных карточных продуктов выступили в роли ключевых инструментов адаптации осуществления платежных операций в экономике РФ.

К сожалению, следует констатировать, что платежная система, обеспечивающая трансграничные

платежи, не столь успешно адаптировалась к западным санкциям. И попытка перевода данного рода финансовых операций в систему СПФС, минуя SWIFT, не смогла всецело решить проблему.

Вопрос об альтернативных механизмах организации международных цепочек поставок и сопровождающих их международных транзакций стоит достаточно остро на повестке текущего дня как для российской экономики в целом, так и для отдельных ее отраслей. Включая, конечно, и строительный сектор [9]. Особую значимость данный вывод приобретает на основе реализованных выше оценок, демонстрирующих влияние нарушения внешнекооперационных торговых связей в строительной отрасли РФ на перспективы роста ВВП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Стоит еще раз отметить, что уровень влияния изменения объемов внешнеэкономических денежных потоков на макроэкономическую динамику оценивается для РФ весьма существенным образом. По результатам проведенного исследования установлено, что прирост на 1 % объема трансграничного денежного потока предопределяет рост ВВП на 0,45 % и наоборот. Учитывая, что объемы импорта строительных материалов в РФ составляли до 2022 г. порядка 2,5 млрд долл. США, что эквивалентно одному проценту от общего объема импорта в Россию, локализация поставок стройматериалов из-за рубежа может спровоцировать снижение динамики роста ВВП в краткосрочной перспективе на 0,45 %. Если говорить о более далеких горизонтах времени, то масштаб последствий будет куда более угрожающим. В этой связи требуются, наряду с традиционными механизмами обеспечения устойчивого развития строительного сектора, и неординарные решения, обеспечивающие локализацию угроз ограничений импорта стройматериалов. Как упоминалось ранее, к таковым необходимо отнести построение и развитие межрегиональных (в мировом масштабе) финансовых систем, мало подверженных конъюнктуре изменения стратегий развития глобальных клиринговых сервисов и фор-

мирующих потенциал устойчивых каналов для проведения финансовых транзакций и обеспечения ритмичности цепочек поставок. Так, в случае интеграции РФ в мировые цепочки транзакционных операций с применением блокчейна в более масштабном формате механизмы нивелирования санкционных угроз получают свое активное развитие и во многом будут способствовать обеспечению независимости национальной экономики РФ и, соответственно, ее секторов от каких-либо ограничений со стороны глобальных регуляторов.

В целом важно также подчеркнуть, что предложенные решения нивелирования рисков нарушения международных цепочек поставок вследствие санкционных ограничений на основе интеграции в систему трансграничных транзакций блокчейн-технологий будут во многом способствовать развитию концептуальных подходов традиционных школ экономической теории, концентрирующих свое внимание на исследовании факторов экономического роста. Усиливающиеся процессы трансформации производительных факторов в условиях шестого технологического уклада диктуют необходимость изучения новых точек развития, в том числе и в сфере организации экономических отношений нового уровня, основанных, в частности, на применении блокчейна и построении новых моделей международной торговли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Масальский М.Г. Экономические санкции. Влияние экономических санкций на Российскую Федерацию // Экономика и социум. 2022. № 4–3 (95). С. 95–97. EDN EUFDCQ.
2. Осипов В.С., Зельднер А.Г., Панкова С.В., Новицкий Н.А., Попов В.В., Цытин А.П. и др. Экономика импортозамещения: оценка влияния структуры внешнеторговых товаропотоков на развитие экономического потенциала и импортозамещения в Российской Федерации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 7. С. 31–44. EDN ZRBTRP.
3. Bas M., Strauss-Kahn V. Does importing more inputs raise exports? Firm-level evidence from France // Review of World Economics. 2014. Vol. 150. Issue 2. Pp. 241–275. DOI: 10.1007/s10290-013-0175-0
4. Stone S., Messent J., Flaig D. Emerging Policy Issues // OECD Trade Policy Papers. 2015. DOI: 10.1787/5js1m6v5qd5j-en
5. Zhang T., Huang Z. Blockchain and central bank digital currency // ICT Express. 2021. Vol. 8. Issue 2. Pp. 264–270. DOI: 10.1016/j.ict.2021.09.014
6. Сафиуллин М.Р., Ельшин Л.А., Прыгунова М.И. Волатильность и конкурентоспособность регионов в условиях внешнеполитических и конъюнктурных изменений (на примере регионов Приволжского федерального округа) // Вестник Россий-

ского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2014. № 12 (78). С. 115–127. EDN THNFEL.

7. Ельшин Л.А. Сравнительный анализ циклических колебаний региональных экономических систем: моделирование, идентификация, прогнозирование // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2017. № 4. С. 138–156. EDN ZDDBWP.

8. Кочергин Д. Цифровые валюты центральных банков: мировой опыт // Мировая экономика и международные отношения. 2021. Т. 65. № 5. С. 68–77. DOI: 10.20542/0131-2227-2021-65-5-68-77. EDN CUETEZ.

9. Дубровская Е.С. Российская экономика в условиях санкций: текущее положение и перспективы инновационного развития // Креативная экономика. 2022. Т. 16. № 11. С. 4553–4564. DOI: 10.18334/ce.16.11.116637. EDN FUKNXM.

10. Сахаров Д.М. Цифровые валюты центральных банков: ключевые характеристики и влияние на финансовую систему // Финансы: теория и практика. 2021. Т. 25. № 5. С. 133–149. DOI: 10.26794/2587-5671-2021-25-5-133-149. EDN NCJJXC.

11. Сафиуллин М.Р., Савеличев М.В., Ельшин Л.А. Место и эволюция блокчейн-технологий в системе экономического развития // Научное обозрение: те-

ория и практика. 2019. Т. 9. № 8 (64). С. 1191–1200. DOI: 10.35679/2226-0226-2019-9-8-1191-1200. EDN RAEOJF.

12. Сидоренко Э. Цифровая валюта центральных банков: экономические сценарии и прогнозы // Международные процессы. 2021. Т. 19. № 2 (65). С. 151–165. DOI: 10.17994/IT.2021.19.2.65.8. EDN EAFGWE.

13. Engert W., Fung B.S.C. Central bank digital currency: Motivations and implications // Bank of Canada Staff Discussion Paper. 2017. URL: <https://www.bankofcanada.ca/wp-content/uploads/2017/11/sdp2017-16.pdf>

14. Alonso S.L.N., Jorge-Vazquez J., Forradellas R.F.R. Central banks digital currency: Detection of optimal countries for the implementation of a CBDC and the implication for payment industry open innovation // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2021. Vol. 7. Issue 1. P. 72. DOI: 10.3390/joitmc7010072

15. Allen D.W.E., Berg C., Davidson S., Novak M., Potts J. International policy coordination for blockchain supply chains // Asia & the Pacific Policy Studies. 2019. Vol. 6. Issue 3. Pp. 367–380. DOI: 10.1002/app5.281

16. Ganne E., Patel D. Blockchain & DLT in trade: A reality check, World Trade Organization (WTO) and Trade Finance Global (TFG). 2019.

17. Tapscott D., Tapscott A. How Blockchain will change organizations // MIT Sloan Management Review. 2019. Vol. 58. Issue 2. Pp. 10–13.

18. Boar C., Holden H., Wadsworth A. Impending arrival — a sequel to the survey on central bank digital currency // Bank for International Settlements. BIS Papers, 2020. No. 107. URL: <https://www.bis.org/publ/bppdf/bispap107.pdf>

19. Boar C., Wehrli A. Ready, steady, go? // Results of the third BIS survey on central bank digital currency. BIS Papers, 2021. No. 114. URL: <https://www.bis.org/publ/bppdf/bispap114.pdf>

20. Allesie D., Sobolewski M., Vaccari L., Pignatelli F. Blockchain for digital government // JRC. 2019.

21. Glaser F., Hawlitschek F., Notheisen B. Blockchain as a Platform // Business Transformation through Blockchain. Palgrave Macmillan, Cham. 2019. Pp. 121–143.

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 29 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 20 марта 2024 г.

О Б АВТОРАХ: **Марат Рашитович Сафиуллин** — доктор экономических наук, профессор, проректор по вопросам экономического и стратегического развития; **Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ)**; 420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; директор; **Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан (ЦПЭИ АН РТ)**; 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 23/6; РИНЦ ID: 430501, Scopus: 55352002400, ResearcherID: E-1847-2016, ORCID: 0000-0003-3708-8184; c.p@tatar.ru;

Леонид Алексеевич Ельшин — доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой территориальной экономики, Институт управления, экономики и финансов; **Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ)**; 420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; заведующий отделом макроисследований и экономики роста; **Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан (ЦПЭИ АН РТ)**; 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 23/6; РИНЦ ID: 318244, Scopus: 55775977700, ResearcherID: C-2801-2016, ORCID: 0000-0003-3470-7154; Leonid.Elshin@tatar.ru;

Алия Айдаровна Динмухаметова — старший научный сотрудник, Центр стратегических оценок и прогнозов, Институт управления, экономики и финансов; **Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ)**; 420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; ведущий научный сотрудник; **Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан (ЦПЭИ АН РТ)**; 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 23/6; старший преподаватель кафедры бизнес-статистики и экономики; **Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ)**; 420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68; РИНЦ ID: 948290, Scopus: 57205321991, ResearcherID: ABF-4413-2020, ORCID: 0000-0003-1262-5588; Aliya.Abdukaeva@tatar.ru;

Азат Рафикович Шарапов — доктор экономических наук, профессор, первый проректор; **Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма (ПГУ ФКСиТ)**; 420010, Республика Татарстан, г. Казань, территория Деревня Универсиады, зд. 35; РИНЦ ID: 477890, Scopus: 57903186400; c.p@tatar.ru.

Вклад авторов:

Сафиуллин М.Р. — научное руководство, развитие методологии.

Ельшин Л.А. — концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста.

Динмухаметова А.А. — концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Шарапов А.Р. — развитие методологии, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Masalskiy M.G. Economic sanctions. Impact of economic sanctions on the Russian Federation. *Economy and Society*. 2022; 4-3(95):95-97. EDN EUFDCQ. (rus.).
2. Osipov V.S., Zel'dner A. G., Pankova S.V., Novitskiy N.A., Popov V.V., Tsypin A.P. et al. Import substitution economy: impact assessment of structure of foreign trade commodity flows on development of economic potential and import substitution in the Russian Federation. *Intelligence. Innovation. Investments*. 2017; 7:31-44. EDN ZRBTRP. (rus.).
3. Bas M., Strauss-Kahn V. Does importing more inputs raise exports? Firm-level evidence from France. *Review of World Economics*. 2014; 150(2):241-275. DOI: 10.1007/s10290-013-0175-0
4. Stone S., Messent J., Flaig D. Emerging Policy Issues. *OECD Trade Policy Papers*. 2015. DOI: 10.1787/5js1m6v5qd5j-en
5. Zhang T., Huang Z. Blockchain and central bank digital currency. *ICT Express*. 2021; 8(2):264-270. DOI: 10.1016/j.ict.2021.09.014
6. Safullin M.R., El'shin L.A., Prygunova M.I. Volatility and competitiveness of regions in the context of foreign policy and market changes (on the example of the regions of the Volga Federal District). *Bulletin of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov*. 2014; 12(78):115-127. EDN THNFEL. (rus.).
7. Elshin L.A. Comparative analysis of cyclic fluctuations of regional economic systems: modeling, identification, forecasting. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2017; 4:138-156. EDN ZDDBWP. (rus.).
8. Kochergin D.V. Central banks digital currencies: world experience. *World Economy and International Relations*. 2021; 65(5):68-77. DOI: 10.20542/0131-2227-2021-65-5-68-77. EDN CUETEZ. (rus.).
9. Dubrovskaya E.S. The Russian economy under sanctions: current situation and prospects for innovative development. *Creative Economy*. 2022; 16(11):4553-4564. DOI: 10.18334/ce.16.11.116637. EDN FUKNXM. (rus.).
10. Sakharov D.M. Central bank digital currencies: key aspects and impact on the financial system. *Finance: Theory and Practice*. 2021; 25(5):133-149. DOI: 10.26794/2587-5671-2021-25-5-133-149. EDN NCJJXC. (rus.).
11. Safullin M.R., Savelichev M.V., Elshin L.A. Place and evolution of blockchain technology in the system of economic development. *Science Review: Theory and Practice*. 2019; 9(8):(64):1191-1200. DOI: 10.35679/2226-0226-2019-9-8-1191-1200. EDN RAE0JF. (rus.).
12. Sidorenko E. Digital currency of central banks: economic scenarios and forecasts. *International Trends*. 2021; 19(2):(65):151-165. DOI: 10.17994/IT.2021.19.2.65.8. EDN EAFGWE. (rus.).
13. Engert W., Fung B.S.C. Central bank digital currency: Motivations and implications. *Bank of Canada Staff Discussion Paper*. 2017. URL: <https://www.bankofcanada.ca/wp-content/uploads/2017/11/sdp2017-16.pdf>
14. Alonso S.L.N., Jorge-Vazquez J., Forradellas R.F.R. Central banks digital currency: Detection of optimal countries for the implementation of a CBDC and the implication for payment industry open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2021; 7(1):72. DOI: 10.3390/joitmc7010072
15. Allen D.W.E., Berg C., Davidson S., Novak M., Potts J. International policy coordination for blockchain supply chains. *Asia & the Pacific Policy Studies*. 2019; 6(3):367-380. DOI: 10.1002/app5.281
16. Ganne E., Patel D. *Blockchain & DLT In Trade: A Reality Check, World Trade Organization (WTO) and Trade Finance Global (TFG)*. 2019.
17. Tapscott D., Tapscott A. How Blockchain Will Change Organizations. *MIT Sloan Management Review*. 2019; 58(2):10-13.
18. Boar C., Holden H., Wadsworth A. Impending arrival — a sequel to the survey on central bank digital currency. *Bank for International Settlements*. BIS Papers, 2020; 107. URL: <https://www.bis.org/publ/bppdf/bispap107.pdf>
19. Boar C., Wehrli A. Ready, steady, go? *Results of the third BIS survey on central bank digital currency*. BIS Papers, 2021; 114. URL: <https://www.bis.org/publ/bppdf/bispap114.pdf>
20. Allesie D., Sobolewski M., Vaccari L., Pignatelli F. Blockchain for digital government. *JRC*. 2019.
21. Glaser F., Hawlitschek F., Notheisen B. Blockchain as a Platform. *Business Transformation through Blockchain*. Palgrave Macmillan, Cham. 2019; 121-143.

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on August 29, 2023.

Approved for publication on March 20, 2024.

BIONOTES: **Marat R. Safullin** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Vice-Rector for Economic and Strategic Development; **Kazan (Volga Region) Federal University (KFU)**; 18 Kremlin st., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation; Director; **Center of Advanced Economic Research in the Academy of Sciences**

of the Republic of Tatarstan; 23/6 Karl Marx st., Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 430501, Scopus: 55352002400, ResearcherID: E-1847-2016, ORCID: 0000-0003-3708-8184; c.p@tatar.ru;

Leonid A. Elshin — Doctor of Economics Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Territorial Economics, Institute of Management, Economics and Finance; **Kazan (Volga Region) Federal University (KFU);** 18 Kremlin st., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation; Head of the Department of Macro-Research and Economics of Growth; **Center of Advanced Economic Research in the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan;** 23/6 Karl Marx st., Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 318244, Scopus: 55775977700, ResearcherID: C-2801-2016, ORCID: 0000-0003-3470-7154; Leonid.Elshin@tatar.ru;

Aliya A. Dinmukhametova — Senior Researcher, Center for Strategic Estimates and Forecasts, Institute of Management, Economics and Finance; **Kazan (Volga Region) Federal University (KFU);** 18 Kremlin st., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation; leading researcher; **Center of Advanced Economic Research in the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan;** 23/6 Karl Marx st., Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation; senior lecturer of the Department of Business Statistics and Economics; **Kazan National Research Technological University (KNRTU);** 68 K. Marksa st., Kazan, 420015, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 948290, Scopus: 57205321991, ResearcherID: ABF-4413-2020, ORCID: 0000-0003-1262-5588; Aliya.Abdukaeva@tatar.ru;

Azat R. Sharapov — Doctor of Economics Sciences, Professor, First Vice-Rector; **Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism;** build. 35 territory Universiade Village, Kazan, 420010, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RSCI: 477890, Scopus: 57903186400; c.p@tatar.ru.

Contribution of the authors:

Marat R. Safiullin — scientific guidance, development of methodology.

Leonid A. Elshin — the concept of the study; development of methodology, writing the source text.

Aliya A. Dinmukhametova — concept of research, revision of the text; final conclusions.

Azat R. Sharapov — development of methodology, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69:504(985)

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1031-1046

Критерии выбора технологий экологически безопасного строительства в Арктике

Александр Алексеевич Кузьменков¹, Александр Вячеславович Кайчёнов²

¹ Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ); г. Петрозаводск, Россия;

² Мурманский арктический университет (МАУ); г. Мурманск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность создания и совершенствования цифровых инструментов для комплексных научных исследований и опытно-конструкторских работ на основе информационной модели строительного объекта на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). Исследование фокусируется на экологически безопасном (зеленом) строительстве в САР Российской Федерации на основе логически взаимосвязанных моделей: проектной модели, натурной модели, математических моделей и цифровой модели-двойника. К основным критериям отнесены энергоэффективность и экологическая безопасность зданий.

Материалы и методы. Объектами исследования являются два здания-близнеца, спроектированные и построенные по программе научных исследований в Республике Карелия и Мурманской области. Объекты одинаковы, но условия их функционирования различаются. Предложена методология комплексного научного исследования для каждой стадии ЖЦ объектов. Применены методы сравнительного анализа и метод экспертных оценок, а также методы, представленные в нормативно-технических документах системы технического регулирования РФ, относящиеся к технологическим аспектам строительства.

Результаты. Определены четыре группы базовых критериев строительства для САР РФ: внешняя среда, внутренняя среда, материалы и технологии, энергоэффективность. Разработана информационная модель исследования (Research Information Model — RIM) как инструмент комплексного научного изучения в области технологий строительства в САР. Рассмотрена практическая реализация результатов исследования на двух указанных выше объектах, включая цифровой мониторинг состояния объектов в течение двух лет (2021–2023 гг.). Определены перспективы продолжения исследований.

Выводы. Обоснована необходимость разработки и на примере двух построенных объектов подтверждена целесообразность использования разработанной информационной модели исследования. Опыт применения основных блоков модели и цифрового мониторинга состояния объектов в течение двух лет подтвердил целесообразность использования информационного моделирования и продолжения исследований для совершенствования технологий строительства в САР.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационная модель исследования, технологии информационного моделирования, цифровизация строительства, методология научного исследования, «зеленое» строительство, северные и арктические территории, критерии оценки, системы сертификации, технологии экологически безопасного строительства, жизненный цикл зданий

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кузьменков А.А., Кайчёнов А.В. Критерии выбора технологий экологически безопасного строительства в Арктике // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 1031–1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1031-1046

Автор, ответственный за переписку: Александр Алексеевич Кузьменков, akka1977@bk.ru.

Environmentally friendly construction technologies selection criteria in the Arctic

Alexander A. Kuzmenkov¹, Alexander V. Kaychenov²

¹ Petrozavodsk State University (PetrSU); Petrozavodsk, Russian Federation;

² Murmansk Arctic University (MAU); Murmansk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper substantiates the relevance of creating and improving digital tools for complex scientific research and development work based on the information model of a construction object at all stages of the life cycle. The research focuses on environmentally safe (green) construction in the northern and Arctic regions. The purpose of the study is to substantiate a set of criteria for “green” for the northern and Arctic regions of the Russian Federation on the basis of logically interrelated models: a design model, a full-scale model, mathematical models and a digital twin model. The main criteria include energy efficiency and environmental safety of buildings.

Materials and methods. The objects of the study are two twin buildings designed and built according to the programme of scientific research in the Republic of Karelia and the Murmansk region. The objects are identical, but the conditions of their functioning are different. The methodology of complex scientific research for each stage of the life cycle of objects is proposed. The methods of comparative analysis and the method of expert assessments were used, as well as the methods presented in the normative and technical documents of the technical regulation system of the Russian Federation related to the technological aspects of construction.

Results. Four groups of basic construction criteria for the northern and Arctic regions of the Russian Federation are defined: external environment; internal environment; materials and technologies; energy efficiency. The Research Information Model (RIM) was developed as a tool for comprehensive scientific research in the field of construction technologies in the northern and Arctic regions. The practical implementation of the results of the study at the two above-mentioned facilities, including digital monitoring of the condition of the facilities for two years (2021–2023), is considered. Prospects for the continuation of the research are determined.

Conclusions. The necessity of the development is justified and the expediency of using the developed information model of research is confirmed by the example of two constructed objects. The experience of using the main blocks of the model and digital monitoring of the condition of objects for two years has confirmed the expediency of using information modelling and continuing research to improve construction technologies in the northern and Arctic regions.

KEYWORDS: Research Information Model (RIM), information modelling technologies, digitalization of construction, methodology of scientific research, green construction, green technologies, northern and Arctic territories, evaluation criteria, certification systems, environmentally safe construction technologies, life cycle of buildings

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 075-03-2023-128).

FOR CITATION: Kuzmenkov A.A., Kaychenov A.V. Environmentally friendly construction technologies selection criteria in the Arctic. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):1031-1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1031-1046 (rus.).

Corresponding author: Alexander A. Kuzmenkov, akka1977@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Энергоэффективные и экологически безопасные («зеленые») технологии получили широкое развитие в последние годы как в мире, так и в Российской Федерации [1–4]. Использование экологических безопасных технологий на арктических и субарктических территориях особенно важно для обеспечения их устойчивого развития [5–8]. Экологические, экономические и социальные аспекты развития Арктики наиболее чувствительны к глобальному изменению климата и техногенным воздействиям [3, 4, 9, 10]. Ряд проблем связан с тем, что развитие «зеленого» строительства на арктических территориях имеет объективные ограничения из-за суровых климатических условий, особых экосистем, неразвитой транспортно-логистической структуры и т.д. [11, 12]. Однако, несмотря на довольно широкое развитие «зеленого» строительства на арктических территориях в соответствии с «зелеными» стандартами, было сертифицировано небольшое количество зданий [13, 14]. Небольшое количество сертифицированных «зеленых» зданий в Арктике указывает на недостаточный учет условий арктических и субарктических территорий в существующих системах оценки и сертификации «зеленого» строительства.

Также бурным развитием в строительной отрасли России в настоящее время характеризуются сферы цифровизации строительства [15–19] и внедрения технологий информационного моделирования [20–24] на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) зданий и сооружений. Несмотря на растущее число научных публикаций по обозначенной теме, проблема совершенствования технологий строительства в северных регионах требует продолжения исследований.

Актуальность настоящей статьи обуславливается необходимостью создания и использования в научных исследованиях комплексного инструмента с применением современных методов цифровизации и технологий информационного моделирования применительно к зданиям и сооружениям на всех этапах их ЖЦ.

Цель исследования — формирование набора критериев для «зеленого» строительства в северных регионах и последующая оценка эффективности использования этих критериев в течение ЖЦ «зеленых» зданий в Республике Карелия и Мурманской области на основе ряда моделей: проектной, натурной (физической), математической модели и цифровой модели-двойника. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- анализ критериев действующих «зеленых» стандартов (зарубежных и российских) с учетом оценки их применимости к зданиям на северных и арктических территориях;
- оценка разработанного набора критериев для «зеленых» зданий на основе набора моделей на разных этапах ЖЦ двух идентичных «зеленых» зданий, построенных в разных регионах АЗРФ.

Современное состояние обозначенной выше научной проблемы отражено в ряде работ, которые имеют прямое отношение к теме данного прикладного исследования. Вопросы развития экологически безопасного («зеленого») строительства и применения «зеленых» технологий в целях реализации принципов устойчивого развития исследованы в работах В.И. Теличенко, А.А. Бенужа, А.А. Лapidуса, М.Ю. Слесарева [25–28]. Вопросы цифровизации процессов реализации инвестиционно-строительных проектов представлены в работе

М.Ю. Викторова [29]. В исследовании А.Н. Ларионова и А.А. Карачевой цифровизация рассматривается как инновационный фактор снижения сроков и повышения качества строительства [30]. А.Н. Ларионов, В.В. Соловьев, А.А. Морозов исследовали вопрос формирования модели капитальных затрат в реалиях цифровизации строительства [31]. Вопросы разработки структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий изучали В.А. Волкодав, И.А. Волкодав [32]. Новые возможности применения технологий информационного моделирования в строительстве и их использования на различных этапах ЖЦ зданий различного назначения приведены в публикациях Е.А. Гусаковой, А.В. Приходько, А.Н. Овчинниковой и А.Н. Ларионова [33–35]. Проблемы и перспективы внедрения технологии информационного моделирования в области строительства исследованы в трудах [36–38].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регионы (территории) реализации исследований

В качестве территорий для реализации комплексного исследования были выбраны два региона РФ — Республика Карелия и Мурманская область.

В составе территории Республики Карелия представлены территории, как приравненные к районам Крайнего Севера, так и территории, находящиеся в районах Крайнего Севера. К территориям Крайнего Севера относятся Беломорский, Калевальский, Лоухский, Кемский районы и Костомукшский городской округ, которые входят в Арктическую зону РФ. Мурманская область полностью входит в Арктическую зону РФ и относится к территориям Крайнего Севера.

Выполнение исследовательских задач осуществлялось в Мурманске, Мурманской области и в Петрозаводске, Республике Карелия, в следующих климатических условиях:

- Петрозаводск расположен на 61°50'33" северной широты, 34°22'52" восточной долготы. Климат характеризуется как умеренно-континентальный с морскими чертами: среднегодовая температура составляет +3,8 °С; ежегодно выпадает около 756 мм осадков;

- Мурманск расположен на 68°57'13,4" северной широты, 33°03'30,3" восточной долготы. Климат близок к умеренно холодному: среднегодовая температура составляет –0,4 °С; ежегодно выпадает около 601 мм осадков.

Табл. 1. Климатические параметры рассматриваемых территорий (в соответствии с СП 131.13330.2012 «Строительная климатология») [39]

Table 1. Climatic parameters of the territories under consideration (in accordance with CP 131.13330.2012 “Building climatology”) [39]

Климатические параметры Climate parameters	Рассматриваемые территории Considered territories	
	Мурманская область, г. Мурманск Murmansk region, the city of Murmansk	Республика Карелия, г. Петрозаводск Republic of Karelia, city of Petrozavodsk
Высота над уровнем моря, м Height above sea level, m	13	26
Географические координаты Geographical coordinates	68°58'45.1"N, 33°5'33"E	61°47'5.6"N, 34°20'48.8"E
Температура воздуха в самый холодный пятидневный период, °С, с обеспеченностью 0,92 Air temperature of the coldest five-day period, °C, with security 0.92	–30	–28
Абсолютная минимальная температура воздуха, °С Absolute minimum air temperature, °C	–39	–43
Продолжительность, дни и средняя температура воздуха, °С, периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 °С Duration, days, and average air temperature, °C, of the period with average daily air temperature ≤ 8 °C	275 –3,4	235 –3,2
Среднемесячная относительная влажность воздуха в самый холодный месяц, % Average monthly relative humidity of the coldest month, %	84	86
Количество осадков за ноябрь–март, мм Rainfall for November–March, mm	138	169
Средняя скорость ветра, м/с, за период со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 °С Average wind speed, m/s, for a period with an average daily air temperature of ≤ 8 °C	4,9	3,2
Среднегодовая температура, °С Average annual temperature, °C	0,3	2,8

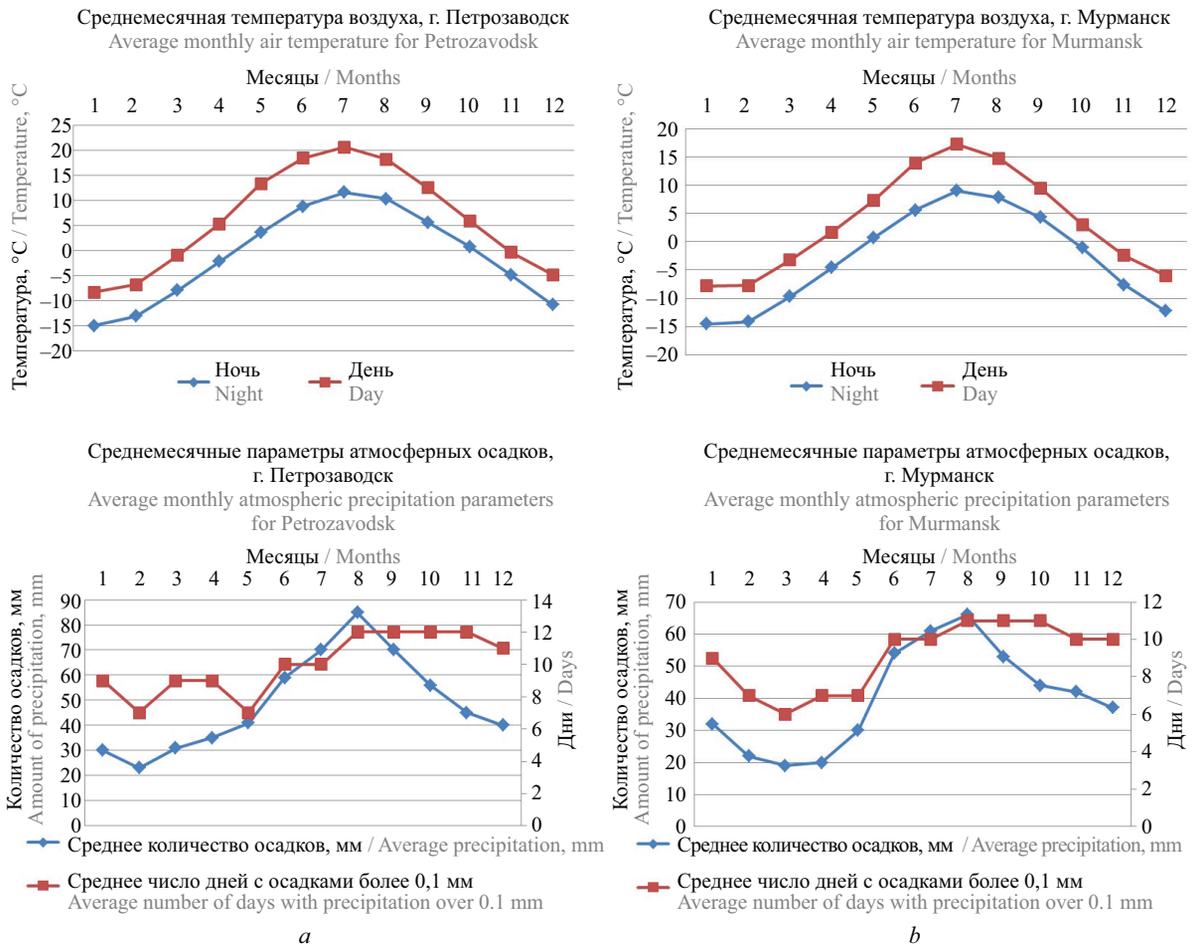


Рис. 1. Среднемесячные климатические данные для Петрозаводска (а) и Мурманска (b) по данным Центра гидрометеорологических исследований РФ

Fig. 1. Average monthly climate data for Petrozavodsk (a) and Murmansk (b) according to the Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation

Сравнение природных и климатических условий в соответствии с СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» представлено в табл. 1. На рис. 1 показаны среднемесячные климатические данные [39].

Методология комплексного исследования

Комплексное исследование представлено следующими этапами:

- разработка (выбор) критериев оценки «зеленого» строительства на северных и арктических территориях РФ на основе анализа систем сертификации «зеленого» строительства;
- оценка разработанных критериев на основе проектных, физических, математических моделей и цифровых двойных моделей, отражающих ЖЦ здания: проектирование, строительство, эксплуатация, снос и утилизация.

Концептуальная методологическая схема комплексного исследования представлена на рис. 2.

Циклический подход к оценке критериев предусматривает использование механизма обратной связи на нескольких уровнях:

- использование механизма экспертной оценки на этапе определения набора критериев для арктических зеленых зданий;
- тестирование системы критериев, основанной на наборе моделей, на соответствие целям, для которых они разработаны (мониторинг, измерение, верификация и тестирование) на уровне каждой модели.

Для анализа критериев систем «зеленой» сертификации были выбраны стандарты и системы, которые хорошо известны и имеют наиболее широкое применение в России [14]: две международные системы экологической сертификации — LEED v.3 (Лидерство в энергетическом и экологическом проектировании, США) и BREEAM New Construction 2016 (Метод экологической оценки строительных исследований, Великобритания) и две российские системы — СТО НОСТРОЙ 2.35.4–2011 («Зеленое строительство»). Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания, Россия) и GREENZOOM 2014 (Система практических рекомендаций по повышению энерго-

эффективности, водоотдачи и экологичности гражданских зданий, Россия).

Предполагается, что анализ и оценка разработанного набора критериев будут проводиться последовательно в рамках различных моделей в соответствии со схемой на рис. 2.

Проектная модель представляет собой проектные решения экспериментального зеленого здания для северных и арктических территорий [40]. Для разработки проектной модели «зеленого» здания используется набор критериев, отобранных и дополнительно разработанных с учетом результатов исследования. Экспериментальное проектирование, строительство и эксплуатация предполагают возведение двух полностью идентичных зеленых

зданий, отвечающих разработанным критериям для зеленого строительства в Арктике, расположенных в двух северных регионах России.

Натурные (физические) модели двух экспериментальных зданий в Мурманске и Петрозаводске созданы с учетом разработанных проектных решений и сформированного набора критериев для зеленого строительства. Изучение натуральных моделей позволит сравнить результаты теоретической и экспериментальной оценки критериев.

Математическая модель экспериментальных зданий реализована на основе данных анализа проектных и натуральных моделей зданий, а также результатов полевых исследований на основе модельных зданий. Математическая модель — это численное

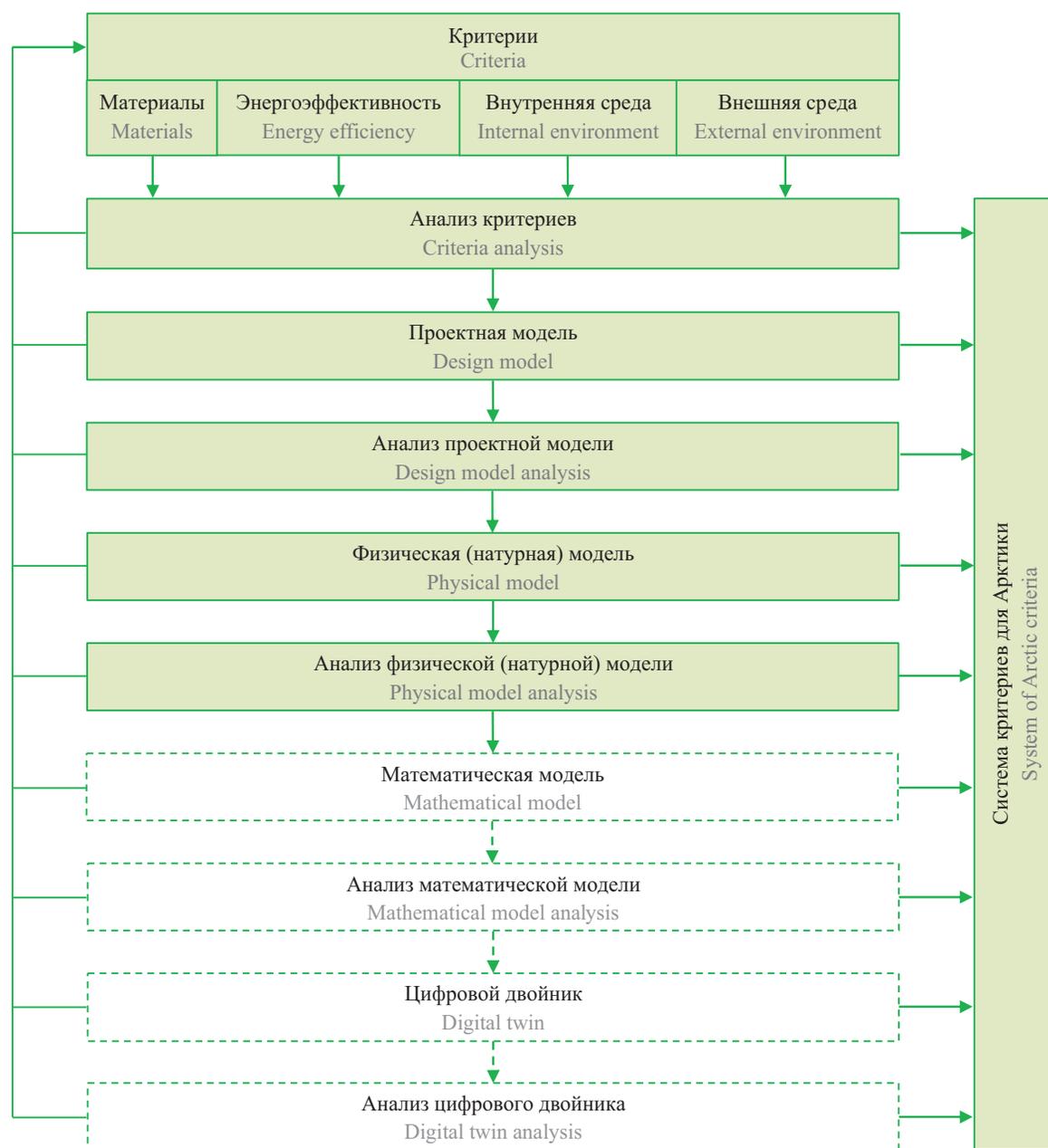


Рис. 2. Концептуальная методологическая схема комплексного исследования

Fig. 2. Conceptual methodological scheme of complex research

(имитационное) представление процессов, происходящих с физическими объектами (модельными зданиями). Математические модели позволят более широко изучить процессы, происходящие с физическими моделями в реальных условиях их эксплуатации, а также исследовать те процессы, которые не могут быть представлены в физических моделях из-за существующих ограничений экспериментальных зданий.

Цифровые двойники (ЦД) экспериментальных (модельных) зданий формируются по принципам, аналогичным построению информационных моделей зданий (ВИМ-моделей). Ключевое отличие заключается в том, что набор метаданных для элементов трехмерной модели здания формируется за счет данных, полученных в результате научных исследований и анализа полученных результатов. В качестве базовой модели принимается ВИМ-модель экспериментального здания. Когда базовая модель насыщается данными, полученными в результате анализа математической модели, можно получить ЦД изделий (экспериментальных зданий), включающие результаты математического моделирования процессов, происходящих с модельными объектами. Создание системы ЦД (зданий в Мурманске и Петрозаводске) даст возможность проводить вычислительные эксперименты (вариантное моделирование) и прогнозировать режимы и состояния модельных объектов для оценки соответствия разработанным критериям зеленого строительства в Арктике.

Методы исследования

На первом этапе комплексного исследования проводится отбор и анализ критериев «зеленого» строительства для северных и арктических территорий. Для определения набора критериев рассматриваются критерии вышеупомянутых систем сертификации экологически чистого строительства. В каждом из этих стандартов представлены пять укрупненных групп критериев (далее именуемых базовыми группами): внешняя среда, внутренняя среда, энергоэффективность, материалы и эффективность использования воды [14]. Определяется вес (значимость) выбранных групп в каждой рассматриваемой системе сертификации. Дальнейшее рассмотрение предусматривает анализ отдельных групп критериев. Анализ и применимость критериев и их групп были проведены с учетом действующей российской нормативной базы.

При анализе значимости критериев применительно к условиям Арктики использованы методы сравнительного анализа и сопоставления, а также метод экспертных оценок. В экспертной оценке принимает участие группа экспертов, имеющих соответствующий опыт работы в исследуемой области на северных и арктических территориях. Оценка основана на сравнении рассматриваемых критериев с факторами, влияющими на экологичность здания в Арктике. На основе результатов анализа в группах

предложен набор критериев для оценки проектных решений и существующих зданий в Арктике [14].

Второй этап комплексного исследования включает проверку предложенных критериев и их компонентов. Проверка критериев заключается в их мониторинге в различных условиях, в учете их взаимного влияния, а также в уточнении значимости критерия для экологической оценки зданий на арктических территориях. Верификация и анализ критериев осуществляются на базе набора моделей — проектной, натурной, математической и цифровой в модели в виде ЦД [41].

Разработка проектной модели (проектных решений) экспериментального здания выполняется с помощью методов вариантного проектирования и сравнения. Проектные решения экспериментальных зданий предусматривают использование материалов и технологий, наиболее соответствующих принципам «зеленого» строительства [42–45]. Разработка проектных решений проводится на основе нормативной базы РФ и с учетом условий рассматриваемых территорий. Анализ проектной модели осуществляется путем обоснования проектных решений, принятых с учетом концепции «зеленого строительства» [40].

Физические натурные модели позволяют проводить большое количество разнообразных исследований для проверки разработанных критериев «зеленого» строительства в Арктике. Исследования выполняются в реальных условиях эксплуатации модульных зданий и позволяют сравнить результаты для двух северных территорий России. Одним из примеров комплекса исследований, основанных на натуральных моделях, является оценка теплофизических свойств ограждающих конструкций зданий [39, 46, 47]. Натурные объекты необходимы, однако их создание требует больших ресурсов. Поэтому, чтобы расширить возможности прикладных исследований, используются, как отмечено выше (рис. 2), математические модели.

Для проведения экспериментальных исследований, основанных на физических моделях, применяются методы, изложенные в нормативных документах РФ. При рассмотрении теплофизических свойств ограждающих конструкций зданий используются следующие нормативные методы исследования:

- метод тепловизионного обследования экспериментальных зданий. Методика обследования предусмотрена ГОСТ Р 54852–2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций». Целью тепловизионного исследования является контроль качества теплозащиты многослойных конструкций зданий в натуральных условиях, выявление мест с пониженными теплозащитными свойствами, а также сравнение данных по двум объектам в разных регионах;
- метод измерения плотности тепловых потоков через ограждающие конструкции в реальных

условиях эксплуатации зданий. Способ измерения плотности тепловых потоков описан в ГОСТ 25380–2014 «Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции». Измерение тепловых потоков через ограждающие конструкции позволяет получить данные о фактических тепловых потоках в конкретных выбранных точках исследуемых конструкций, сравнить их с расчетными данными и оценить фактические тепловые потери;

- метод определения фактических теплофизических свойств строительных материалов в соответствии с ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Для проведения этого исследования в процессе строительства были собраны образцы конструкционных и теплоизоляционных материалов. Методика предусматривает проведение лабораторных испытаний образцов в стационарном режиме теплового потока. Фактические теплофизические характеристики материалов необходимы для уточнения проектных решений и дальнейшего построения теоретических моделей тепловых полей ограждающих конструкций и пространственного моделирования распределения тепловых потоков экспериментального здания;

- метод определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в полевых условиях. Методика определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций изложена в ГОСТ 31167–2009 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях». Этот метод позволит оценить обобщенные характеристики воздухопроницаемости ограждений экспериментальных зданий. Одновременные исследования воздухопроницаемости и тепловизионной съемки дадут возможность получить более подробные результаты оценки ограждающих конструкций.

Для уточнения данных исследований в реальных условиях эксплуатации, наряду с нормативными методами, используется экспериментальная методика. Экспериментальная методика основана на разработанной системе мониторинга параметров внутреннего микроклимата, окружающей среды и строительных конструкций [48]. Основными параметрами, контролируемой системой мониторинга, являются температура и влажность [49], а также объем потребления электроэнергии в процессе эксплуатации зданий [50]. При строительстве экспериментальных зданий в слоях конструкций устанавливается система датчиков [48]. На этапе разработки проектной модели было определено 25 измерительных узлов на ключевых участках строительных конструкций: утепленная кровля и нижнее перекрытие, стены на разной высоте, места расположения различных типов теплоизоляционных материа-

лов, а также углы здания и стены вблизи оконных проемов. Датчики расположены в измерительном узле на каждом слое многослойной конструкции. В зданиях установлена система счетчиков для учета потребления электроэнергии. Потребление электроэнергии контролируется отдельно для каждой инженерной системы здания (отопление, освещение, вентиляция) и для каждой отдельной части здания (каркас и бревно). Реализована удаленная передача данных для их записи в режиме реального времени [51].

Модельный объект (экспериментальное здание) — это многосвязный объект с распределенными параметрами. Исследование таких объектов предлагается проводить на основе математических моделей двумя классами методов: с использованием численного моделирования и с помощью идентификации параметров [52]. В соответствии с методами, отраженными в ГОСТ Р 57188–2016 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения» и ГОСТ Р 57700.1–2017 «Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования», численное моделирование проводится с применением уравнений в частных производных. Объекты, аналитическое описание которых связано с большим количеством факторов, которые трудно учесть, исследуются с использованием идентификации параметров модели.

Модельный объект позволяет создавать комплекс математических моделей, полученных как с помощью численного моделирования, так и с идентификацией параметров. Проверка адекватности и корректности математических моделей моделируемому объекту (валидация и верификация в соответствии с методологией ГОСТ Р 57188–2016) («Стандарт для верификации и валидации в области вычислительной гидродинамики и теплопередачи»), ASME V & V 10–2006 «Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics Revision PINS» («Руководство по верификации и валидации версии PINS вычислительной механики твердого тела») и ASME V & V 10.1–2012 «An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics» («Иллюстрация концепций верификации и валидации в вычислительной механике твердого тела»).

Наряду с математическим моделированием процессов в модельном объекте осуществляется компьютерное моделирование: функциональное, структурное, геометрическое, физико-механическое, физико-химическое, технико-экономическое, технологическое (рис. 2). Для описания динамических процессов, происходящих в модельном объ-

екте, в основном используются математические модели моделирования процессов в соответствии с ГОСТ Р 57412–2017 «Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения».

На основе измеренных значений параметров микроклимата и потребления электроэнергии, полученных от модельного объекта, а также созданных математических моделей разрабатывается программное обеспечение для компьютерного моделирования, которое проходит валидацию (проверку на соответствие математической модели в соответствии с ГОСТ Р 57700.24–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис») и верификацию (проверку на соответствие реальному миру в соответствии с ГОСТ Р 57700.25–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации»).

Система математических и компьютерных моделей позволит создать цифровую модель изделия (модельного объекта) после оценки соответствия требованиям, предъявляемым к изделию согласно ГОСТ 16504–81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Общие термины и определения».

Сочетание двухсторонних информационных связей с изделием (система мониторинга модельного объекта) и цифровой моделью продукта позволит получить цифровой двойник (ЦД) изделия (ЦД модельного объекта) [53] в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа критериев наиболее распространенных систем стандартов «зеленого» строительства определены четыре основные группы критериев «зеленого» строительства для Арктики: внешняя среда, внутренняя среда, материалы и энергоэффективность.



a

На основе сформированных критериев «зеленого» строительства для северных и арктических территорий была разработана проектная модель. Проведен анализ проектной модели на соответствие принятых проектных решений набору критериев указанных выше базовых групп.

Согласно разработанной проектной модели реализована физическая (полномасштабная) модель в виде построенных «зеленых» зданий-близнецов на двух северных территориях РФ (рис. 3). Разработаны программы исследования физических (натурных) моделей для оценки соответствия индивидуальным критериям, включенным в основные группы. Анализ физической модели и подтверждение ее характеристик, свойств, состояний и параметров критериев проводится с использованием экспериментальной методики. Суть методики заключается в непрерывном измерении и накоплении данных о температуре, влажности, потребляемой электроэнергии и количестве углекислого газа в воздухе на основе автоматизированной системы мониторинга.

Анализ результатов проектирования и физической модели выявил ограничения их комплексной оценки на соответствие разработанным критериям зеленого строительства в Арктике. Модельные (экспериментальные) здания представляют собой сложные и многосвязные системы, характеризующиеся наличием большого количества взаимодействующих внешних и внутренних факторов, что требует применения нового комплексного исследовательского инструмента. В качестве комплексного инструмента авторы предлагают использовать исследовательскую информационную модель (рис. 4), которая включает, помимо проектных и физических моделей, методы математического моделирования и технологию ЦД [42].

Информационная модель исследования (Research Information Model — RIM) представлена в виде «серого ящика». Входными параметрами RIM являются критерии в области «зеленого» строительства, системы сертификации, законы, нормативные акты, знания, а также существующие про-



b

Рис. 3. Экспериментальные здания (модельные объекты) в Петрозаводске (*a*) и в Мурманске (*b*)

Fig. 3. Experimental buildings (model objects) in Petrozavodsk (*a*) and Murmansk (*b*)

блемы. Для функционирования RIM необходимо применять методологию, концепции, парадигмы, исследования мирового уровня и исследовательские программы. Результаты RIM представляют собой систему критериев для арктической зоны, теорию, знания, а также возможные пути решения проблемы. На этапе исследования корректируются входные параметры RIM.

Внутри «серого ящика» показаны взаимосвязи между моделями, описанными ранее в исследовании: проектной моделью и физической моделью, основанной на ней, математическими моделями и цифровыми аналогами.

Цветные стрелки на рис. 4 показывают информационные потоки между моделями. Информационный поток 1 «Данные проектной BIM-модели для строительства» характеризует информацию, передаваемую для создания физических моделей на основании проектной модели (проектной документации в виде информационной модели здания — BIM). В то же время данные о фактическом исполнении проектных решений в натуре (информационный поток 2 «Данные зданий для коррекции данных BIM-модели») могут быть отражены в модели проекта в виде корректировки. Из физической модели (модельные здания) экспери-

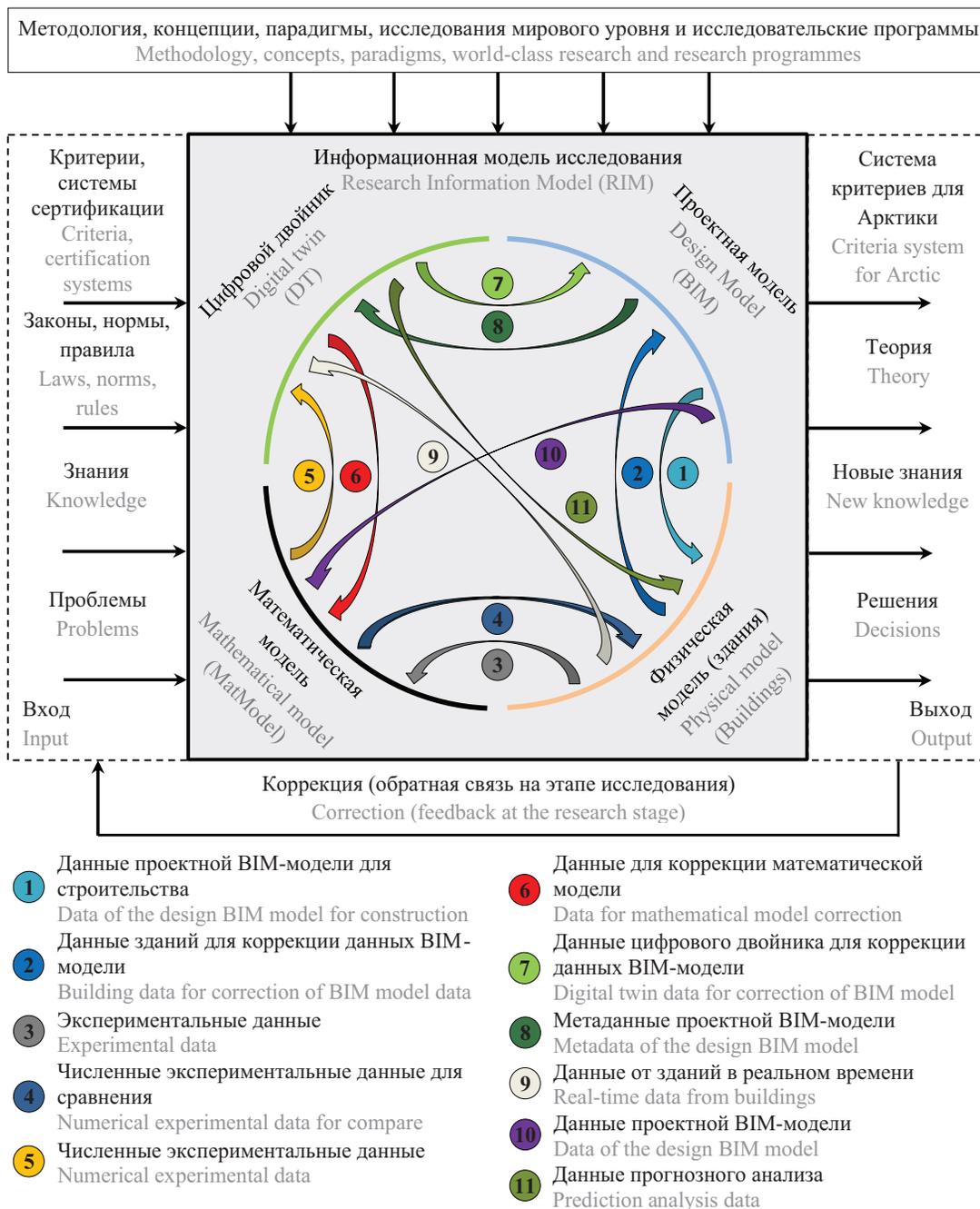


Рис. 4. Информационная модель исследования (RIM)

Fig. 4. Research Information Model (RIM)

ментальные данные (информационный поток 3 «Экспериментальные данные»), а также данные из проектной модели (информационный поток 10 «Данные проектной BIM-модели») поступают в математическую модель, которая представляет собой набор математических моделей процессов, происходящих в модельных (экспериментальных) зданиях. Использование математического моделирования дает возможность дополнить объект результатами численного моделирования режимов, состояний и ситуаций, которые физическая модель не позволяет реализовать из-за структурных, энергетических и других ограничений.

Для проверки и валидации математической модели значения результатов численного моделирования сравниваются со значениями из реальных экспериментальных данных (информационный поток 4 «Численные экспериментальные данные для сравнения»). Информация, полученная в результате математического моделирования, вводится в модель ЦД (информационный поток 5 «Численные экспериментальные данные»). Цифровой двойник представляет собой набор BIM-моделей (информационный поток 8 «Метаданные проектной BIM-модели»), построенных на основе данных проектной модели, результатов численного моделирования (информационный поток 5 «Численные экспериментальные данные») и данных реального времени, поступающих из физической модели (информационный поток 9 «Данные от зданий в реальном времени»).

Цифровой двойник позволяет выполнять: прогнозную аналитику массива сведений и передачу их в физическую модель для сравнения (информационный поток 11 «Данные прогнозного анализа»), коррекцию математических моделей процессов (информационный поток 6 «Данные для коррекции математической модели»), коррекцию проектной модели (информационный поток 7 «Данные цифрового двойника для коррекции данных BIM-модели») для получения пилотного проекта (типового проекта повторного применения) с наилучшими характеристиками для северных и арктических территорий.

Экспериментальное исследование физической модели с использованием математического моделирования и объединение ее с ЦД даст возможность получить комплексный инструмент, позволяющий учитывать большее количество взаимовлияющих факторов в процессах создания моделей зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По первичным результатам комплексного исследования в сфере экологически безопасного (зеленого) строительства в северных и арктических регионах и обоснования необходимости создания инструмента для проведения комплексных научных исследований и опытно-конструкторских работ на основе информационной модели строительного

объекта на всех этапах его ЖЦ можно сделать следующие выводы.

Обоснована актуальность и определена цель комплексного исследования, которая заключается в обосновании и формировании набора критериев «зеленого» строительства и их последующей оценке в течение ЖЦ зданий в арктических и субарктических регионах РФ на основе ряда логически взаимосвязанных моделей: проектной модели, натурной (физической) модели, математических моделей и цифровой модели-двойника. Сформулированы задачи комплексного исследования: анализ критериев действующих «зеленых» стандартов (зарубежных и российских) с учетом оценки их применимости к зданиям на северных и арктических территориях; оценка разработанного набора критериев на основе набора моделей на разных этапах ЖЦ зданий в регионах АЗРФ. Определены регионы для проведения исследования — Республика Карелия и Мурманская область.

Выделены этапы комплексного исследования, а также набор моделей, используемых на этапах исследования. Разработана методология комплексного научного исследования в области «зеленого» строительства в Арктике (рис. 2). Для каждого этапа определены методы научного исследования и используемая модель. На первом этапе комплексного исследования (отбор и анализ критериев «зеленого» строительства для северных и арктических территорий) применены методы сравнительного анализа и сопоставления, а также метод экспертной оценки, который применяется при анализе значимости критериев применительно к условиям Арктики. На втором этапе комплексного исследования (проверка (верификация и анализ) предложенных критериев на основе набора моделей — проектных, натуральных, математических и моделей ЦД изделий и технологических процессов)) применены методы, представленные в НТД технического регулирования РФ.

По результатам анализа критериев наиболее распространенных систем стандартов «зеленого» строительства установлены четыре базовые группы критериев зеленого строительства для АЗРФ: внешняя среда, внутренняя среда, материалы и энергоэффективность. На основе сформированных критериев разработана проектная модель экспериментального здания. Проведен анализ проектной модели на соответствие принятых проектных решений набору критериев указанных выше базовых групп. Согласно разработанной проектной модели реализована физическая полномасштабная модель в виде построенных зданий-близнецов в Республике Карелия и Мурманской области (рис. 3). Разработаны программы исследований моделей для оценки соответствия базовым критериям.

Разработана информационная модель исследования (Research Information Model — RIM) (рис. 4) как методологический инструмент комплексного научного исследования в области «зеленого» строи-

тельства в Арктике. Использование исследовательской информационной модели позволит проводить комплексные исследования: сбор, анализ данных, прогнозирование возможных изменений технологических параметров при изменении режимов работы объектов, а также внешних случайных воздействий в процессе эксплуатации. При реализации комплексного исследования на основе исследовательской информационной модели (RIM) модельные объекты становятся полноценными цифровыми (виртуальными) полигонами для тестирования критериев зеленого строительства в арктической зоне, в том числе в рамках учебного процесса при подготовке специалистов по направлению «Строительство» и смежным основным профессиональным образовательным программам.

Апробация результатов представленного исследования в рамках научных конференций показала

адекватность предложенного подхода к реализации комплексных прикладных исследований [14, 39, 41, 43, 45–50]. На базе экспериментальных зданий (модельных объектов) в г. Петрозаводске и г. Мурманске (рис. 3) с 2021 г. по настоящий момент в реальном времени ведется мониторинг и накопление данных системы мониторинга температуры и влажности окружающей среды, внутреннего микроклимата зданий и состояния ограждающих конструкций. Однако в связи с тем, что модельные (экспериментальные) здания с системами мониторинга представляют собой сложные и многосвязные системы, характеризующиеся наличием большого количества взаимовлияющих внешних и внутренних факторов, отдельные этапы и положения требуют проведения дальнейших исследований, что обозначено на концептуальной методологической схеме комплексного исследования (рис. 2) пунктирными линиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бенуж А.А., Колчигин М.А. Анализ концепции «зеленого» строительства как механизма по обеспечению экологической безопасности строительной деятельности // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 161–165. EDN PJOUSN.
2. Теличенко В.И., Бенуж А.А. Обзор и классификация рейтинговых систем сертификации зданий и сооружений // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 31–1 (50). С. 239–243. EDN RDPBRB.
3. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация будущего — фактор экологической безопасности среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 90–97. EDN XWBDZJ.
4. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 558–567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567
5. Васильева Ж.В., Буряченко С.Ю. Базовые принципы концепции «зеленого строительства» // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. 2018. № 1. С. 12–15. EDN VWFTQA.
6. Никифорова В.А., Каверзина Л.А., Нужина И.П. «Зеленое» строительство как эффективный инструмент устойчивого развития территорий // Проблемы социально-экономического развития Сибири. 2020. № 1 (39). С. 44–50. DOI: 10.18324/2224-1833-2020-1-44-50. EDN DTKCNS.
7. Ротарь А.М. «Зеленое» строительство как эффективный инструмент устойчивого развития территорий // Путеводитель предпринимателя. 2022. Т. 15. № 2. С. 63–68. DOI: 10.24182/2073-9885-2022-15-2-63-68
8. Томаков В.И., Томаков М.В. Зеленое строительство в концепции устойчивого развития российских городов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 2 (71). С. 16–31. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-2-16-31. EDN YTPVFP.
9. Ravasio L., Riise R., Sveen S.E. Green Buildings in the Arctic region: a literature review // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 172. P. 16002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017216002
10. Теличенко В.И., Щербина Е.В. Социально-природно-техногенная система устойчивой среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 5–12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12. EDN KUKAGX.
11. Gutman S., Teslya A. Environmental safety as an element of single-industry towns' sustainable development in the Arctic region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 180. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/180/1/012010
12. Voronina E. Development of the Arctic regions of the Russian Federation: Drivers of greening // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 10051. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410051
13. Ravasio L., Sveen S.E., Riise R. Green building in the Arctic region: State-of-the-art and future research opportunities // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 22. P. 9325. DOI: 10.3390/su12229325
14. Buryachenko S.Yu., Kuzmenkov A.A., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Popova O.M. Green building in the northern and Arctic regions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

2021. Vol. 937. Issue 4. P. 042030. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042030

15. Кисель Т.Н., Прохорова Ю.С. Уровень цифровизации российских предприятий инвестиционно-строительной сферы // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 971–987. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.971-987. EDN MGOJFC.

16. Лapidус А.А. Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN VMHWDX.

17. Гусакова Е.А., Овчинников А.Н. Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1191–1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200. EDN BVAAAZ.

18. Лapidус А.А., Шевченко И.С. Основные принципы формирования организационно-технологической платформы научно-технического сопровождения уникальных объектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 7. С. 1138–1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1138-1147. EDN LRPIZJ.

19. Лapidус А.А., Мотылев Р.В., Сокольников В.В. Формирование методологии детерминированной модели организации строительного производства на основе концепции организационно-технологической платформы строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 116–131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY.

20. Сафина Г.Л., Еришов Д.С., Корнев А.С., Хайруллин Р.З. Моделирование процессов создания высокотехнологичной продукции строительного назначения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 5. С. 785–797. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.785-797. EDN CECEAJ.

21. Ларионов А.Н., Приходько А.В. Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 2. С. 270–282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH.

22. Дмитриев А.Н., Владимирова И.Л. Технологии информационного моделирования в управлении строительными проектами России // Промышленное и гражданское строительство. 2019. №. 10. С. 48–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.48-59. EDN FXXZAA.

23. Бурова О.А., Божик А.С., Шевцов А.В. Применение BIM технологий в строительстве: отечественный и мировой опыт // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2020. № 2. С. 84–90. EDN NYOTET.

24. Чурбанов А.Е., Шамара Ю.А. Влияние технологии информационного моделирования на развитие инвестиционно-строительного процесса // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 824–835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835. EDN XUWKPR.

25. Теличенко В.И. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности: понятия, термины, стандарты // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 364–372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372. EDN YNCVQX.

26. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Сухина Е.А. Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 438–462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462. EDN EXLUMH.

27. Теличенко В.И., Лapidус А.А., Слесарев М.Ю. Анализ и синтез образов экологически ориентированных инновационных технологий строительного производства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDOCL.

28. Викторов М.Ю. Цифровизация процессов реализации инвестиционно-строительных проектов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4 (35). С. 516–523. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-4-516-523. EDN MLLUEV.

29. Ларионов А.Н., Карачева А.А. Цифровизация как инновационный фактор снижения сроков и повышения качества жилищного строительства в Московской области // Журнал исследований по управлению. 2020. № 6. С. 30–57. EDN RPKJT.

30. Ларионов А.Н., Соловьев В.В., Морозов А.А. Формирование модели капитальных затрат в реалиях цифровизации строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 91–101. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.91-101. EDN OWNGYT.

31. Волкодав В.А., Волкодав И.А. Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 6. С. 867–906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906. EDN RGQGTG.

32. Гусакова Е.А. Информационное моделирование жизненного цикла проектов высотного строительства // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 1 (112). С. 14–22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-22. EDN YNHJXW.

33. Ларионов А.Н., Приходько А.В. Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 2. С. 270–282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH.

34. Гусакова Е.А., Овчинников А.Н. Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1191–1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200. EDN BVAAAZ.

35. Уткина В.Н., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р. Проблемы и перспективы внедрения технологии информационного моделирования в об-

ласти строительства в России: проблемы и перспективы внедрения // Основы экономики, управления и права. 2019. № 1 (19). С. 57–61. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_57. EDN YPHGPG.

36. *Болотова А.С., Маршавина Я.И.* Проблемы внедрения технологии информационного моделирования в России // Строительное производство. 2021. № 2. С. 70–80. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_70. EDN PEYWAQ.

37. *Ларионов А.Н., Приходько А.В.* Оценка перспектив использования технологий информационного моделирования в жилищном строительстве в России на период до 2030 года // Экономика строительства. 2022. № 9. С. 67–78. EDN DBQGIL.

38. *Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O.* Factors influencing the rating of low-rise wooden houses as “green” buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 05018. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305018

39. *Кузьменков А.А., Караченцева Я.М., Дербенёв А.В.* Обоснование конструктивных и технологических решений экспериментального деревянного малоэтажного здания с учетом принципов «Зеленого строительства» // Resources and Technology. 2021. Т. 18. № 1. С. 66–93. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5522. EDN VTLGWT.

40. *Kuzmenkov A., Kaychenov A., Karachentseva I., Vasileva Z., Buryachenko S., Voronin Z.* Information model of green building research in the Arctic: methodological aspects // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 420. P. 03021. DOI: 10.1051/e3sconf/202342003021

41. *Kuzmenkov A., Kolesnikov G., Voronin Z.* Green Technologies of Wooden Building for Arctic // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 385–398. DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5_30

42. *Buryachenko S.Yu., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Kuzmenkov A.A.* The influence of enclosing structures of walls on the energy efficiency of a wooden building (on the example of the international project KO 1089 “Green Arctic Building”) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 539. Issue 1. P. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012024

43. *Kuzmenkov A., Tikhonov E., Kolesnikov G.* Thermal bridges in wall panels of wooden frame houses // Proceedings of EECSE 2019. 2020. Pp. 329–336. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_29

44. *Karachentseva I., Kuzmenkov A., Kaychenov A., Voronin Z.* Energy-efficient building materials for Arctic conditions as a criterion for “green building” //

E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 383. P. 04075. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304075

45. *Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O.* Monitoring of thermophysical properties of wooden buildings envelopes in climatic conditions of Murmansk and Petrozavodsk // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 05025. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405025

46. *Kuzmenkov A., Karachentseva I.* Refinement of thermal engineering calculations results taking into account actual materials characteristics // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 402. P. 07001. DOI: 10.1051/e3sconf/202340207001

47. *Kuzmenkov A.A., Kuvshinov D.A., Buryachenko S.Yu., Kaychenov A.V., Karachentseva I.M., Voronin Z.A.* Monitoring system for temperature and relative humidity of the experimental building // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2131. Issue 5. P. 052070. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052070

48. *Kuzmenkov A., Buryachenko S., Kuvshinov D., Karachentseva I., Popova O., Voronin Z. et al.* Humidity Regime of a Double Wooden Wall Made of Rounded Logs // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Pp. 1276–1284. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_142

49. *Kaychenov A., Lukin S., Yarotskaya A., Selyakov I., Ereschenko V., Kuzmenkov A.* Automated systems for monitoring microclimate parameters and electricity metering of an experimental building // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 389. P. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202338902005

50. *Кайчёнов А.В., Лукин С.А., Яроцкая А.А.* Разработка системы автоматизированного мониторинга параметров микроклимата и автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии модельного объекта // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2022. Т. 25. № 4. С. 298–304. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-4-298-304. EDN ICJLSN.

51. *Stolyanov A., Zhuk A., Vlasov A., Maslov A., Kuranova L., Kaychenov A.* Complex for modeling and optimization the sterilization process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 403. Issue 1. P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012016

52. *Кайченов А.В., Благовещенский И.Г.* Комплексная модернизация систем управления процессами тепловой обработки водных биоресурсов Арктики с использованием интеллектуальных технологий : монография. Курск, 2022. 251 с. EDN QCTQSF.

Поступила в редакцию 8 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 7 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 7 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александр Алексеевич Кузьменков** — кандидат экономических наук, доцент кафедры технологии и организации строительства; **Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ)**; 185910,

Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33; SPIN-код: 2863-5238, РИНЦ ID: 359459, Scopus: 57220389900, ORCID: 0000-0001-6365-4421; akka1977@bk.ru;

Александр Вячеславович Кайчёнов — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и вычислительной техники; **Мурманский арктический университет (МАУ)**; 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13; SPIN-код: 7342-6350, РИНЦ ID: 544546, Scopus: 57210912615, ORCID: 0000-0002-0358-8888; kc_05@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Benuzh A.A., Kolchigin M.A. Analysis of the Concept of “Green” Construction as a Vehicle to Ensure the Environmental Safety of Construction Activities. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 12:161-165. EDN PJOUNS. (rus.).
2. Telichenko V.I., Benuzh A.A. Review and classification of rating systems for building certification. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013; 31-1(50):239-243. EDN RDPBRB. (rus.).
3. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. Green standardization of the future is a factor of ecological safety of the life environment. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 8:90-97. EDN XWBDZJ. (rus.).
4. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. “Green” standardization of technologies for forming the nature-friendly living environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(5):(116):558-567. DOI: 10.22227/1997-0935. 2018.5.558-567 (rus.).
5. Vasil'yeva ZH. V., Buryachenko S.Yu. Basic principles of the “green building” concept. Proceedings of higher educational institutions. *The Arctic region*. 2018; 1:12-15. EDN VWFTQA. (rus.).
6. Nikiforova V.A., Kaverzina L.A., Nuzhina I.P. “Green” construction as an effective tool of sustainable development of territories. *Issues of Social-Economic Development of Siberia*. 2020; 1(39):44-50. DOI: 10.18324/2224-1833-2020-1-44-50. EDN DTKCNS. (rus.).
7. Rotar A.M. “Green” construction as an effective tool for sustainable development of territories. *Entrepreneur's Guide*. 2022; 15(2):63-68. DOI: 10.24182/2073-9885-2022-15-2-63-68 (rus.).
8. Tomakov V.I., Tomakov M.V. Green building in the concept of sustainable development of Russian cities. *Proceedings of the Southwest State University*. 2017; 21(2):(71):16-31. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-2-16-31. EDN YTPVFP. (rus.).
9. Ravasio L., Riise R., Sveen S.E. Green Buildings in the Arctic region : a literature review. *E3S Web of Conferences*. 2020; 172:16002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017216002
10. Telichenko V.I., Shcherbina E.V. Social-natural-technogenic system of sustainable environment of vital activity. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 6:5-12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12. EDN KUKAGX. (rus.).
11. Gutman S., Teslya A. Environmental safety as an element of single-industry towns’ sustainable development in the Arctic region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 180:012010. DOI: 10.1088/1755-1315/180/1/012010
12. Voronina E. Development of the Arctic regions of the Russian Federation: Drivers of greening. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:10051. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410051
13. Ravasio L., Sveen S.E., Riise R. Green building in the Arctic region: State-of-the-art and future research opportunities. *Sustainability*. 2020; 12(22):9325. DOI: 10.3390/su12229325
14. Buryachenko S.Yu., Kuzmenkov A.A., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Popova O.M. Green building in the northern and Arctic regions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 937(4):042030. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042030
15. Kisel T.N., Prokhorova Yu.S. The level of digitalization of Russian enterprises in the investment and construction sector. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):971-987. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.971-987. EDN MGOJFC. (rus.).
16. Lapidus A.A. Organizational and technological platform of construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(4):516-524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX. (rus.).
17. Gusakova E.A., Ovchinnikov A.N. Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1191-1200. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.8.1191-1200. EDN BBAAAZ. (rus.).
18. Lapidus A.A., Shevchenko I.S. Main principles of the formation of organizational and technological platform for scientific and technical support of unique objects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(7):1138-1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1138-1147. EDN LRPIZJ. (rus.).

19. Lapidus A.A., Motylev R.V., Sokolnikov V.V. Development of a methodology underlying a deterministic model of construction work arrangements on the basis of the concept of an organizational and technological platform for construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(1):116-131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY. (rus.).
20. Safina G.L., Ershov D.S., Kornev A.S., Khayrullin R.Z. Modelling of processes of creation of hi-tech construction products. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):785-797. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.785-797. EDN CECEAJ. (rus.).
21. Larionov A.N., Prikhodko A.V. Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):270-282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH. (rus.).
22. Dmitriyev A.N., Vladimirova I.L. BIM Technologies in Building Construction Projects Management in Russia. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 10:48-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.10.48-59. EDN FXXZAA. (rus.).
23. Burova O.A., Bozhik A.S., Shevtsov A.V. Application of BIO technologies in construction: domestic and international experience. *Bulletin of the MFUA*. 2020; 2:84-90. EDN HYOTET. (rus.).
24. Churbanov A.E., Shamara Yu.A. The impact of information modelling technology on the development of investment-construction process. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(7):(118):824-835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835. EDN XUWKPR. (rus.).
25. Telichenko V.I. Green technologies of living Environment: Concepts, terms, Standards. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(4):(103):364-372. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.364-372. EDN YNCVQX. (rus.).
26. Telichenko V.I., Benuzh A.A., Suhinina E.A. Interstate green standards of formation sustainable built environment vital activity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):438-462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462. EDN EXLUMH. (rus.).
27. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M.Yu. Analysis and synthesis of images of environmentally oriented innovative technologies of construction production. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1298-1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDACL. (rus.).
28. Viktorov M.Yu. Digitalization in the field of investment and construction projects. Proceedings of Universities. Investment. Construction. *Real Estate*. 2020; 10(4):(35):516-523. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-4-516-523. EDN MLLUEV. (rus.).
29. Larionov A., Karacheva A. Digitalization as an innovative factor of reducing the time and increasing the quality of housing construction in the Moscow region. *Journal of Management Studies*. 2020; 6:30-57. EDN RIIKJT. (rus.).
30. Larionov A.N., Solovev V.V., Morozov A.A. Development of a capital expenditure model in the context of construction digitalization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(1):91-101. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.91-101. EDN OWNGYT. (rus.).
31. Volkodav V.A., Volkodav I.A. Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):867-906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906. EDN RGQGTG. (rus.).
32. Gusakova E.A. Information modeling of life cycle of high-rise construction projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(1):(112):14-22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-22. EDN YNHJXW. (rus.).
33. Larionov A.N., Prikhodko A.V. Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):270-282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282. EDN ZVIYHH. (rus.).
34. Gusakova E.A., Ovchinnikov A.N. Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1191-1200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1191-1200. EDN BBAAAZ. (rus.).
35. Utkina V.N., Gryaznov S.U., Babushkina D.R. Problems and prospects of implementation of information modeling technology in the construction field of Russia: problems and prospects of implementation. *Economy, Governance and Law Basis*. 2019; 1(19):57-61. DOI: 10.51608/23058641_2019_1_57. EDN YPHGPG. (rus.).
36. Bolotova A.S., Marshavina Ja.I. Problems of the Implementation of BIM Technologies in Russia. *Construction Production*. 2021; 2:70-80. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_70. EDN PEYWAO. (rus.).
37. Larionov A.N., Prikhodko A.V. Assessment of the prospects for the use of information modeling technologies in housing construction in Russia for the period up to 2030. *Construction Economics*. 2022; 9:67-78. EDN DBQGIL. (rus.).

38. Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O. Factors influencing the rating of low-rise wooden houses as “green” buildings. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:05018. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305018
39. Kuzmenkov A.A., Karachentseva I.A., Derbenev A.V. Substantiation of constructive and technological solutions for an experimental low-rise wooden house in accordance with the principles of “Green Building”. *Resources and Technology*. 2021; 18(1):66-93. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5522. EDN VTLGWT. (rus.).
40. Kuzmenkov A., Kaychenov A., Karachentseva I., Vasileva Z., Buryachenko S., Voronin Z. Information model of green building research in the Arctic: methodological aspects. *E3S Web of Conferences*. 2023; 420:03021. DOI: 10.1051/e3sconf/202342003021
41. Kuzmenkov A., Kolesnikov G., Voronin Z. Green Technologies of Wooden Building for Arctic. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 385-398. DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5_30
42. Buryachenko S.Yu., Karachentseva I.M., Voronin Z.A., Kuzmenkov A.A. The influence of enclosing structures of walls on the energy efficiency of a wooden building (on the example of the international project KO 1089 “Green Arctic Building”). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 539(1):012024. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012024
43. Kuzmenkov A., Tikhonov E., Kolesnikov G. Thermal bridges in wall panels of wooden frame houses. *Proceedings of EECE 2019*. 2020; 329-336. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_29
44. Karachentseva I., Kuzmenkov A., Kaychenov A., Voronin Z. Energy-efficient building materials for Arctic conditions as a criterion for “green building”. *E3S Web of Conferences*. 2023; 383:04075. DOI: 10.1051/e3sconf/202338304075
45. Buryachenko S., Voronin Z., Karachentseva I., Kuzmenkov A., Popova O. Monitoring of thermophysical properties of wooden buildings envelopes in climatic conditions of Murmansk and Petrozavodsk. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05025. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405025
46. Kuzmenkov A., Karachentseva I. Refinement of thermal engineering calculations results taking into account actual materials characteristics. *E3S Web of Conferences*. 2023; 402:07001. DOI: 10.1051/e3sconf/202340207001
47. Kuzmenkov A.A., Kuvshinov D.A., Buryachenko S.Yu., Kaychenov A.V., Karachentseva I.M., Voronin Z.A. Monitoring system for temperature and relative humidity of the experimental building. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2131(5):052070. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052070
48. Kuzmenkov A., Buryachenko S., Kuvshinov D., Karachentseva I., Popova O., Voronin Z. et al. Humidity Regime of a Double Wooden Wall Made of Rounded Logs. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021; 1276-1284. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_142
49. Kaychenov A., Lukin S., Yarotskaya A., Selyakov I., Ereschenko V., Kuzmenkov A. Automated systems for monitoring microclimate parameters and electricity metering of an experimental building. *E3S Web of Conferences*. 2023; 389:02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202338902005
50. Kaychenov A.V., Lukin S.A., Yarotskaya A.A. Development of a system for automated monitoring of microclimate parameters and an automated system for monitoring and accounting for electricity of a model facility. *Vestnik of MSTU*. 2022; 25(4):298-304. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-4-298-304. EDN ICJLSN. (rus.).
51. Stolyanov A., Zhuk A., Vlasov A., Maslov A., Kuranova L., Kaychenov A. Complex for modeling and optimization the sterilization process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 403(1):012016. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012016
52. Kaychenov A.V., Blagoveshchenskiy I.G. *Complex modernization of control systems for the processes of heat treatment of Arctic aquatic bioresources using intelligent technologies : monograph*. Kursk, 2022; 251. EDN QCTQSF. (rus.).

Received October 8, 2023.

Adopted in revised form on March 7, 2024.

Approved for publication on March 7, 2024.

BIONOTES: **Alexander A. Kuzmenkov** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction; **Petrozavodsk State University (PetrSU)**; 33 Lenin st., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; SPIN-code: 2863-5238, ID RSCI: 359459, Scopus: 57220389900, ORCID: 0000-0001-6365-4421; akka1977@bk.ru;

Alexander V. Kaychenov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Computer Engineering; **Murmansk Arctic State University (MAU)**; 13 Sportivnaya st., Murmansk, 183010, Russian Federation; SPIN-code: 7342-6350, ID RSCI: 544546, Scopus: 57210912615, ORCID: 0000-0002-0358-8888; kc_05@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.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество 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 аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы второго автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемова С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

