

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 5
2024**

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

Сквозной номер 186

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 5
2024**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	29.05.2024.
Подписан в свет	31.05.2024.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 20,79. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 130	

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	29.05.2024

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО.
РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

М.Г. Круглова, А.Ю. Тихонов
Освоение «не-мест» средствами проектирования малых архитектурных форм из металла 677

Е.Ю. Зайкова, С.С. Феофанова
Фиторемедиационный потенциал озелененных территорий в городе 685

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

С.Г. Саиян, В.Б. Шелепина
Прогнозирование аэродинамических коэффициентов на закручивающиеся формообразующие зданий и сооружений на базе машинного обучения и CFD-моделирования 713

Д.А. Тарасов
Численное и экспериментальное исследование поведения защитного сооружения при ударном воздействии 729

А.Б. Шурин, В.В. Надольский
Опыт применения Еврокодов при проектировании стальных конструкций в Республике Беларусь 740

Л.Р. Гимранов, Р.Г. Гайнетдинов, Л.Р. Хайруллин, Абдурахман Пажвак
Расчет фибробетонного блока в составе локально усиленных узлов ферм из гнутосварных профилей 752

В.Ф. Муцанов, А.Н. Оржеховский, А.В. Муцанов, М.Н. Цепляев
Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности 763

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

П.И. Кийко, Т.Н. Черных, В.П. Плесовских
Факторы, влияющие на эффективность самоочищения строительных материалов с фотокаталитически активными компонентами 778

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

И.Т. Мирсаяпов, Хани Мохаммед Абдо Шараф
Несущая способность и осадки глинистых оснований при блочных циклических нагрузках 789

А.Л. Зуиков, Н.Т. Джумагулова, Абдуламир Лейс Саид Абдуламир
Сравнение методов расчета гидравлических характеристик потока в безнапорных трубопроводах 800

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Т.Е. Гордеева, О.А. Мамаева
Организационно-экономические аспекты ремонта жилых домов с декоративными элементами на крыше 811

Л.А. Опарина, Е.А. Барзыгин, Я.А. Гриднева, Н.С. Касьяненко
Использование инструмента бережливого производства в управлении поставками материалов в течение жизненного цикла строительного проекта 826

Требования к оформлению научной статьи 836

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Maria G. Kruglova, Alexander Yu. Tikhonov
Development of “non-places” by means of designing small architectural forms made of metal 677

Elena Yu. Zaykova, Sofiia S. Feofanova
Phytoremediation potential of green spaces in the city 685

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

Sergey G. Saiyan, Veronika B. Shelepina
Prediction of aerodynamic coefficients for twisting shapes of buildings and structures based on machine learning and CFD-modelling 713

Denis A. Tarasov
Numerical and experimental study of the behavior of a protective structure under impact 729

Andrei B. Shurnyn, Vitali V. Nadolski
Experience of implementation of Eurocodes in the design of steel structures in the Republic of Belarus 740

Linur R. Gimranov, Rishat G. Gainetdinov, Lenar R. Khairullin, Abdurahman Pazhwak
Calculation of a fibre concrete block as a part of locally reinforced truss nodes made of square hollow sections . . 752

Vladimir F. Mushchanov, Anatoly N. Orzhekhovskiy, Alexander V. Mushchanov, Maxim N. Tseplyaev
Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility 763

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Polina I. Kiyko, Tamara N. Chernykh, Valeriy P. Plesovskikh
Factors influencing the efficiency of building materials self-cleaning with photocatalytically active components 778

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Ilizar T. Mirsayapov, Hani Mohammed Abdo Sharaf
Bearing capacity and settlement of clay foundations under block cyclic loading 789

Andrey L. Zuykov, Nazira T. Dzhumagulova, Abdulameer Layth Saeed Abdulameer
Comparison of methods for calculation of hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines 800

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Tatiana E. Gordeeva, Olga A. Mamaeva
Organizational and economic aspects of residential buildings renovation with decorative elements on the roof 811

Lyudmila A. Oparina, Evgenii A. Barzygin, Yaroslava A. Gridneva, Natalya S. Kasyanenko
Using lean manufacturing tools in materials supply management during the life cycle of a construction project. 826

Requirements for research paper design 836

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 applies problems of construction and architecture are admitted to examination and publication in the main topic sections of the journal.

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 712.01:7.011

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.677-684

Освоение «не-мест» средствами проектирования малых архитектурных форм из металла

Мария Геннадьевна Круглова^{1,2}, Александр Юрьевич Тихонов^{2,3}

¹ Межрегиональная общественная организация «Союз кузнецов» России (МОО СК); г. Москва, Россия;

² Общероссийская общественная организация «Творческий союз художников России» (ТСХР);

г. Москва, Россия;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью является изучение основных культурологических подходов к процессу проектирования малых архитектурных форм из металла.

Материалы и методы. Обусловлены поставленными целью и задачами. Использованы методы компаративного (диахронного и синхронного) анализа, различные методики наблюдения современных процессов и феноменов культуры. Проанализировано значительное число эмпирических данных, в том числе работы современных художников по металлу.

Результаты. Осмысление культурологических процессов и явлений позволит развивать современное проектирование малых архитектурных форм (МАФ) из металла, использовать идеи статьи в учебном и творческом процессе. Художественный металл, одно из его трех основных направлений — архитектурный металл, МАФ занимают важное место в формировании единого ценностно-смыслового архитектурного пейзажа современного города. Избыточность пространства и времени, свойственная нашему настоящему, приводит к увеличению количества «не-мест» (где нет места индивидууму) в городском ландшафте. Пространство «не-места» не определимо — ни через идентичность, ни через коммуникации, ни через исторические параллели. Художественно (смыслово) освоить «не-места», превратить их в «места» силы, наполнить значением пейзаж помогают МАФ. Освоение «не-мест» средствами проектирования МАФ из металла становится важной задачей для современного автора.

Выводы. Дальнейшее развитие проектирования МАФ в XXI в., как и культуры в целом, связано с возрастающей мобильностью, выстроенной системой коммуникаций и развитым информационным полем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: художественный металл, проектирование, малые архитектурные формы, цифровая трансформация, культурная диффузия, «места» и «не-места», формообразование

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за полезные замечания.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Круглова М.Г., Тихонов А.Ю. Освоение «не-мест» средствами проектирования малых архитектурных форм из металла // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 677–684. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.677-684

Автор, ответственный за переписку: Мария Геннадьевна Круглова, 7290101@mail.ru.

Development of “non-places” by means of designing small architectural forms made of metal

Maria G. Kruglova^{1,2}, Alexander Yu. Tikhonov^{2,3}

¹ Interregional Public Organization “Union of Blacksmiths” of Russia (IPO UB); Moscow, Russian Federation;

² All-Russian public organization “Creative Union of Artists of Russia” (TSHR); Moscow, Russian Federation;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this paper is to study the main cultural approaches to the process of designing small architectural forms made of metal.

Materials and methods. They are determined by the set goals and objectives. Methods of comparative (diachronic and synchronous) analysis, various methods of observation of modern cultural processes and phenomena were used. During

the work on the paper, a significant amount of empirical data was analyzed, including the work of contemporary metal artists. **Results.** Understanding cultural processes and phenomena will allow to develop modern design of small architectural forms made of metal, to use the ideas of the paper in the educational and creative process. Art metal, one of its three main directions — architectural metal, small architectural forms occupy an important place in the formation of a single value-semantic architectural landscape of a modern city. The redundancy of space and time inherent in our present leads to an increase in the number of “non-places” (where there is no place for an individual) in the urban landscape. The space of “No place” is undefinable — neither through identity, nor through communication, nor through historical parallels. Small architectural forms (SAF) help to master “non-places” artistically (meaningfully), turn them into “places” of power, and fill the landscape with meaning. Development of “non-places” by means of designing SAF made of metal becomes an important task for a modern author.

Conclusions. Further development of the design of small architectural forms in the XXI century, as well as culture in general, is associated with increasing mobility, built-up communication system and developed information field. Art metal, as one of the most ancient occupations of mankind, preserves invaluable heritage and experience of the past, and within the framework of modern art culture initiates the creation of innovations based on new materials and approaches, contributing to the development of creative thinking and creative freedom.

KEYWORDS: art metal, design, small architectural forms, digital transformation, cultural diffusion, “place” and “non-place”, shaping

Acknowledgements. The authors express their gratitude to anonymous reviewers for useful comments.

FOR CITATION: Kruglova M.G., Tikhonov A.Yu. Development of “non-places” by means of designing small architectural forms made of metal. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):677-684. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.677-684 (rus.).

Corresponding author: Maria G. Kruglova, 7290101@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Психологический комфорт индивидуума становится важным качеством современного города. При неминуемой избыточности пространственно-временных характеристик, свойственных урбанистическому ландшафту нашего времени, при обилии инфраструктурных и коммуникационных «не-мест» грамотно спроектированная локальная «точка притяжения» автоматически становится обитаемой. Хотя ментальные карты, целевые аудитории и другие маркетинговые инструменты важны, они не могут заменить творческого подхода и таланта, полета вдохновения художника. Важнейшим является авторский ум, его широкий кругозор, профессиональная «насмотренность» и способность работать с разнообразной информацией из различных областей знания.

Человечество всегда стремилось понять и воплотить в художественных произведениях философские пространственные и временные концепции, изучить взаимосвязи между физическим, символическим и социальным пространствами и временем. Разнообразными манипуляциями с пространством занимался недалеко ушедший постмодернизм. Цифровая трансформация сегодняшнего дня определяет как философские подходы формирования новой среды обитания человека в едином мире без физических границ, с единой культурой, так и практические задачи воплощения этих философских идей. В этом открывшемся людям бесконечном физическом или нефизическом пространстве и времени, в этой вселенной происходит нивелирование, «схлопывание» человеческой личностной природы, сжатие и атомизация индивидуальности, закрытость, уход ее глубоко внутрь — может быть, таким образом и создается новый тип пассионария цифровой

эпохи. Такая личность теряется в «не-месте», старается не проявлять свои глубинные качества, не тратить силы на преодоление и борьбу.

Каким образом проектировать малые архитектурные формы (МАФ) из металла, чтобы не усиливать этот индивидуальный дискомфорт? Ответ на этот вопрос может быть найден в авторских арт-объектах, которые, помимо своих функциональных и физических возможностей, обладают и когнитивными, тактильными, эмоционально насыщенными характеристиками. Такие объекты решают ключевую задачу художника — создание собственного стиля, уникальной манеры и художественного языка, который отличает его от остальных. Этот уникальный опыт — реализованный художественный образ, в любой культуре акцентирует внимание на роли человека-творца, генеративного центра творческой индустрии и достижение им художественной выразительности. Античный философ Аристотель утверждал, что художник создает выразительное произведение, внося свое собственное видение действительности (мимезис), что позволяет зрителю испытать радость от узнавания общего с автором мира [1, 2]. Размышления И. Канта в его работе «Критика способности суждения», где он сравнивает искусство с природой, наукой и ремеслом, также актуальны до сих пор: искусство отличается от ремесла тем, что является свободным волеизъявлением художника, не связанным с экономическими причинами; искусство отличается от природы, как делание от действования, а результат искусства отличается от продукта природы проекцией на него сущности автора [3].

Творческий потенциал личности увеличивается, когда сам процесс творчества интересен и доставляет

радость творящему. МАФ из металла развивают, обостряют когнитивные функции, направленные на познание, эмоциональное восприятие и переработку информации, формируя и личность творца, и зрителя. Эмоция осознается, структурируется и, базируясь на силе воли, становится проектным алгоритмом, праксисом, помогает принять решение. По мнению П.А. Флоренского: «Эмоции выводят личность из самозамкнутой цельности и бесстрастного и бескорыстного мировосприятия и ведут к волевому воздействию на мир, т.е. к тому, чтобы сделать из личности часть мира. Но эмоция как таковая, выводя ум из бесстрастия, лишь наклоняет его к волеизъявлению, хотя до этого еще не доводит. Иначе говоря, эмоция есть рождающееся волеизъявление, которому, однако, может быть, и не суждено раскрыться в мире»¹.

Период цифровой трансформации, который сегодня проживает человечество, отвечает на вопрос о времени — оно ускоряется; о пространстве — оно увеличивается, меняет масштаб, протяженность и глубину, становится бесконечным и многомерным; о роли творческого индивида, возвращающегося в антропологическую рефлексию [4] на фоне развития идентичности личности. Развитие идентичности формируется на основе наиболее устойчивых элементов — ценностей и смыслов, в то же время появление новых возможностей мобильности разного масштаба (вертикальной и горизонтальной), метаструктурная кластеризация культуры, многослойность социальных страт ставит перед человеком задачу выбора «своих» и «чужих». Маршруты диффузии не размывают этот ценностно-смысловой базис, а наоборот, концентрируют и уточняют его, отсеивая второстепенное. Тотальная культурная диффузия вынуждает узаконить единые культурные приоритеты нового этапа цивилизации.

В этих рамках цивилизационных изменений активно мигрируют ценности, влияя и на социокультурные факторы. Цивилизация, по мнению С. Хатингтона [5], определяется культурной целостностью, высоким уровнем идентификации личности. К параметрам идентичности российские маркетологи относят [6] уникальность места и идентификацию территории местным сообществом, практический потенциал и перспективы развития территории. Единое ценностно-смысловое пространство общества (этноса, страты, государства) определяют этнокультурные характеристики миграции и содержащиеся в ней ценностно-смысловые аксиомы. Миграция ценностей [7] влияет на трансформацию идентичности на общем, региональном, локальном уровнях, изменяя общую этническую культуру на фоне интеграции индивида в новую среду; правовых отношений (равноправ-

ных и нет) этнокультурных социумов в государстве. Миграция ценностей культуры [8], ее приток, стабильное состояние и отток проходят от устаревших общественных моделей к новым, удовлетворяющим наиболее актуальные потребности индивидуумов, и формируют мировоззрение. В российской современности — задачи строительства справедливого гражданского общества, базирующегося на общечеловеческих категориях. Эти категории понятны всем людям независимо от религии, языка и образования, они закодированы в материальном и нематериальном культурном наследии русской цивилизации: ценность для русского выступает целью сама по себе, к ней стремятся ради нее самой, не ради выгоды или чувственного удовольствия, т.е. созвучна тому, что раньше называли благом или благодатью. Превращение блага в ценность прослеживается начиная с Декарта, который, в противоположность античной традиции, уже не встраивает человека в тварный Космос, а противопоставляет его Ему, как субстанцию мыслящую — субстанции, протяженной во времени [9].

Р. Диксон в книге «Построение культур» [10] обращает внимание на процесс зарождения культурного артефакта и на условия его успешной передачи и восприятия, то есть определяет диффузию инноваций [11] как непрерывный процесс. Определяемые им четыре фазы культурной диффузии можно дополнить пятой — фазой трансформации, переходом в другое качество диффузии инновации, связанной с изменением общественной парадигмы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной статье был использован междисциплинарный культурологический подход, который позволил применить философские, исторические, искусствоведческие, филологические и социологические методы для изучения материала.

Научный поиск был осуществлен с использованием философских методов индукции и дедукции. В работе применялись традиционные для культурологии методы диахронного и синхронного компаративного анализа, а также аналитические подходы культурной антропологии, семиотики и аксиологии [12]. Изучение процессов и феноменов культуры определило использование натурального, внешнего и включенного наблюдения. В ходе работы над статьей проанализировано значительное число эмпирических данных.

Авторы обращались к культурно-философским исследованиям А.М. Алексеева-Апраксина, И. Канта, А.Ф. Лосева, М. Оже, А. Сливотски, С. Хатингтона; научным публикациям В.В. Деменовой, О.Е. Левченко, А.М. Носонова и других.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Осмысление культурологических процессов и явлений позволит развивать современное проектирова-

¹ Флоренский П.А. Исследования по теории искусства. URL: http://philologos.narod.ru/florensky/fl_space.htm

ние малых архитектурных форм из металла, использовать идеи статьи в учебном и творческом процессе.

Освоение «не-мест» [14] средствами проектирования МАФ из металла

Избыточность пространства и времени, свойственная нашему настоящему, приводит к значительным физическим изменениям: концентрации городского пространства, увеличению количества «не-мест» (где нет места индивидууму, в противовес социологическому понятию «места», которое соотносилось с локализованной культурой). «Не-места» — это и скоростные магистрали, пересадочные узлы, аэропорты, обеспечивающие круговорот грузов и пассажиров, и сам транспорт, и крупные торговые центры, и места долговременного пребывания [13], и другие инфраструктурные градостроительные объекты. Если «место» может быть определено как транслирующее энергию жизни, создающее идентичность, формирующее эмоциональную привязанность и имеющее историю, то пространство, не определяемое никаким способом, является «не-местом» [13]. Обилие «не-мест» наблюдается на территории России в крупных городских агломерациях, в промышленных регионах — «городах-заводах», на малоосвоенных территориях и др. В конкретной реальности современного мира «места» и «не-места» переплетаются, проникают друг в друга, живут одновременно.

Любой творческий артефакт вырастает из антикультуры. Творчество в основе своей протестно. На фоне этого протеста с помощью таланта и воли художником-пассионарием формируется творческая инновация, из нее с течением времени образуется канон, традиция. Из синергетической суммы канонов — культура.

Проектирование МАФ из металла представляет собой эффективный способ освоения «не-мест»: создание функциональных, современных, необыч-

ных арт-объектов позволит преобразить эти области в комфортные для пребывания людей, в места отдыха и встреч, где люди смогут насладиться пейзажем и общением друг с другом; художественно (смыслово, чувственно) превратить в «места» [14], воспитать взгляд и наполнить значением среду. МАФ классифицируют по назначению, материалам и способу изготовления, местоположению. Они выполняют декоративную (ландшафтную (вазоны, ограждения и др.)), развлекательную (туристические, исторические и др.) и конструктивную (зонирование территории (спортивные и игровые комплексы, беседки, павильоны и др.), функциональную (урны, навесы, фонтаны для питья воды, светильники и др.)) функции, служат современным идеям индивидуализации пространства и времени; формируют когнитивные модели [15] и кластерные пространственно-временные блоки; зрительно масштабируют бесконечные инфраструктурные горизонты, позволяют прорабатывать композиционные маршруты и в них композиционные напряжения и остановки.

Примером могут служить авторские арт-объекты из металла с использованием световых сценариев. Металл одновременно конструктивный и декоративный материал, который в соединении со светом в архитектуре сегодняшнего дня стал элементом формообразования пространства, обладает широким диапазоном возможностей. Объектом проектирования в этом случае является художественный образ, распределенный в пространстве и во времени (рис. 1). Через взаимодействие масс свет раскрывает эмоциональный потенциал пространства — «архитектура света», которую применял Ле Корбюзье в монастыре Ла Туретт и капелле в Роншане. Эти примеры до сих пор являются образцами работы архитектора с естественным светом.

Интерес к свету (освещению, свечению, прозрачности) в пространстве присутствует в челове-

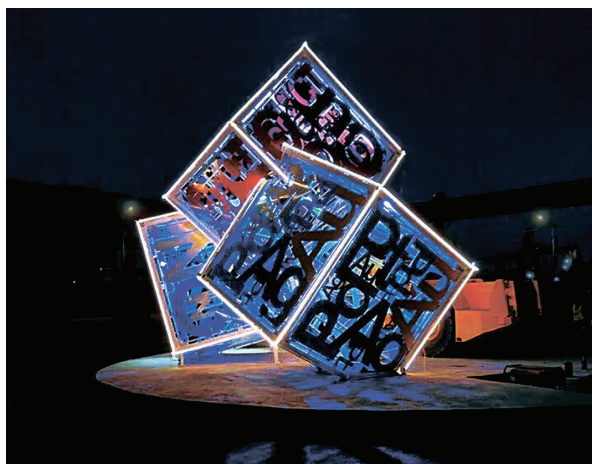


Рис. 1. Арт-объект «Сокровища недр». Дневной и ночной световой сценарий. Авторы: МК СТУДИО (М. Круглова, М. Кузнецов); архитектор А. Тихонов. Норильск, район Талнах, Красноярский край. 2017. Фото М. Кругловой

Fig. 1. Art object "Treasures of the subsoil". Day and night light scenario. Authors: MK STUDIO (M. Kruglova, M. Kuznetsov); architect A. Tikhonov. Norilsk, Talnakh district, Krasnoyarsk Territory. 2017. Photo by M. Kruglova

ской цивилизации на протяжении всей ее истории. Свет считается священной субстанцией, которая выражает творческую силу Бога. В разные эпохи люди придавали свету сакральные символические значения, параллельно изучая его физическую и материальную природу. Способность света выявлять форму, проявлять скрытое позволяет достоверно изображать многомерное пространство на плоскости. В древности были заложены все варианты истолкования света и весь репертуар приемов передачи световой формы, светоносности и светозарности. Как в христианской, так и в буддийской традиции отражение светоносной природы духовных миров отражает ряд важных и системных принципов учения. В текстах Махабхараты свечение изображается как священные огни, пылающие на алтарях, или как блеск золота и драгоценных камней. Понятие «сияющий» в этом контексте синонимично понятию гармонии. Свет становится видимым проявлением энергии, состояния духа, способного освещать миры, т.е. светозарным, и выражает бесконечность материи и переход ее из одного качества в другое [16]. В тибетской традиции хорошо известно чудо явления радужного тела (тиб. 'ja' lus) в момент смерти — тела света. В состоянии тела света мир перестает восприниматься как обладающий пространством и временем. Физическое тело само становится проявлением света, преображаясь в первозданную природу подобно просветленному «телу» Будды [17], которое заполняет пространство светоносной прозрачностью, делая мир единым и пронизываемым, в котором понятие индивидуально-го «я» исчезает [18]. Аналогичные примеры можно найти в Ветхом и Новом Заветах. В Новой истории в статье «Нирвана» русский эволюционист, фило-

соф-космист К.Э. Циолковский говорит о будущем воплощении тела человека как тела света² [20].

Современные архитекторы и дизайнеры работают со светом так, будто он материален: его нужно контролировать, придавать направление и определять пропорции. Он приобретает характеристики, свойственные материальным объектам, а для описания световых эффектов используют признаки, присущие материальному миру, имеет геометрическую составляющую: «горизонтальный» свет, «вертикальный», «диагональный», «рассеянный», «плотный» и др. Сегодня свет (естественный и искусственный) рассматривается не только как бестелесная субстанция, выявляющая и раскрывающая отдельные аспекты пространства, но и как объект физической реальности, и позволяет превратить эту физическую реальность в ее дополненную версию. С развитием технологий свет в пространстве и во времени стал объединяться с цветом (цветным светом) и мультимедиа (технологии 3D, AR, VR, NFT, Arduino, ML и др., в том числе применение искусственного интеллекта, аддитивных технологий); с использованием цифровых технологий в субтрактивном производстве (механической обработке) и традиционном формообразующем производстве (литье, обработка материалов давлением). Эта тенденция актуальна и для художников по металлу, световой сценарий становится неотъемлемой частью проекта для современного городского и природного ландшафта, паблик-арта (рис. 2).

Актуальна в проектировании МАФ и тенденция к синтезу — соединению несоединимого в новом произведении, синергия [19], не сводимая к исполь-

² Циолковский К.Э. Избранные произведения. URL: <https://www.tsolkovsky.org/ru/o-proekte>



Рис. 2. Арт-объект «Кариатиды Авангарда» с кинетическими (ветровыми) элементами. Дневной и ночной световой сценарий. Авторы: МК СТУДИО (М. Круглова, М. Кузнецов, Ю. Хасанова); архитектор А. Тихонов. Крым, Судак; образовательный центр для молодых деятелей культуры и искусства «Таврида». 2020. Фото М. Кругловой

Fig. 2. Art object “Avant-garde Caryatids” with kinetic (wind) elements. Day and night light scenario. Authors: MK STUDIO (M. Kruglova, M. Kuznetsov, Yu. Khasanova); architect A. Tikhonov. Crimea, Sudak; educational centre for young cultural and art workers “Tavrida”. 2020. Photo by M. Kruglova

зованию его элементов (то, о чем писал И. Кант). В синтезе воплощается смысл произведения современного искусства — активизировать чувственное восприятие человека, оказать на него многостороннее эмоциональное воздействие. Синтез является инструментом взаимопроникновения из одного вида искусства в другой. Благодаря ему взаимно обогащаются как образная структура, так и темы произведений — каждый образ раскрывается с разных точек зрения одновременно, появляются новые свойства или качества, создавая эффект эмерджентности [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшее развитие проектирования малых архитектурных форм в «не-местах» в XXI в. связано с увеличивающейся мобильностью, коммуникативной связанностью и доступностью информации [21]. «Не-места» могут становиться или своего рода «Троянским конем» для новой цивилизации, или «Черным лебедем» [22] — носителем новых ценностей и смыслов. С одной стороны, это может быть реконструкцией локальных и исторических тради-

ций этносов и архаических культур, а с другой — экспериментами и поисками новаторских идей в рамках глобального мультикультурного синтеза.

Объектом современного российского искусства, как на Востоке, в европейской Античности и в эпоху Возрождения, вновь становится человек, его микрокосм в соотношении с макрокосмом Вселенной. Современные художники используют новые материалы, цифровые технологии и новаторские подходы, одновременно сохраняя традиции и ценность опыта прошлого. Это помогает развивать творческое мышление, самостоятельность в принятии профессиональных решений и свободу творчества [23]. Искусство способно возродить высокие нравственные идеалы служения Отечеству и ответственности за его судьбу, подать пример созидательного труда и создать артефакты для передачи следующим поколениям культурного кода.

Понимание культурологических процессов и явлений, а также сохранение традиционных ценностей поможет эффективно реагировать на новые вызовы, опережая их и сохраняя русскую цивилизационную идентичность, учитывая богатый культурно-исторический опыт России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Круглова М.Г. Российская креативная экономика — точки соприкосновения дизайна и искусства на примере авторского ювелирного искусства // Теория и практика в сфере искусства костюма и моды (Интеграция в бизнес-сообщество) : сб. мат. науч.-практ. круглого стола. М. : Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2023. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54346935>
2. Лосев А.Ф. История античной эстетики. М. : АСТ; Харьков : Фолио, 2000. С. 247–274.
3. Кант И. Сочинения / пер. с нем. ; под общ. ред. В.Ф. Асмуса, А.В. Гулыги, Т.И. Ойзермана. М. : Мысль, 1963–1966. С. 67–89.
4. Носонов А.М. Теории пространственного развития в социально-экономической географии // Псковский регионологический журнал. 2011. № 11. С. 3–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16360774>
5. Хантингтон С.Ф. Столкновение цивилизаций / пер. с англ. Ю. Новикова. М. ; СПб. : АСТ. С. 72–80.
6. Визгалов Д.В. Брендинг города / предисл. Л.В. Смирнягина. М. : Фонд «Институт экономики города», 2011. С. 76–82.
7. Сливотски А. Миграция ценности: что будет с вашим бизнесом послезавтра? / пер. с англ. А. Шапошниковой. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2006. С. 289–294.
8. Кудрявцев П.С. Космогония Декарта // История физики : учеб. пос. 2 изд., испр. и доп. М. : Просвещение, 1982. С. 47.
9. Smith E.G. The migrations of early culture. Manchester, 1929. P. 73.
10. Dixon R.B. The building of cultures. 1928. New York, London : Charles Scribner's sons. URL: <https://archive.org/details/buildingofcultu00dixorich/page/n5/mode/2up>
11. Rogers E.M. Diffusion of innovations. New York : Free Press. 1962. P. 117.
12. Круглова М.Г. Ювелирное искусство как маркер культурных диффузий (на примере взаимодействия культур России и стран Востока) : дис. ... канд. культ. Иваново, 2022. 210 с.
13. Оже М. «Не-места». Введение в антропологию гипермодерна. НЛО, 1992 (Studia Urbanica). С. 13–19.
14. Мерло-Понти М. Феноменология восприятия / пер. с фр. ; под ред. И.С. Вдовиной, С.Л. Фокина. СПб. : Ювента, Наука, 1999. С. 132–191.
15. Крашенинников А.В. Когнитивная урбанистика: архетипы и прототипы городской среды. М. : Курск, 2020. С. 23–56.
16. Деменова В.В. Светозарность и световая форма в буддийском искусстве (к постановке вопроса) // Известия Уральского федерального университета. Серия 2: Гуманитарные науки. 2015. № 1 (136). С. 62–74.

17. Бир Р. Энциклопедия тибетских символов и орнаментов / пер. с англ. Люки Бубенковой. М. : Ориенталия, 2011. XX, С. 130–219.

18. Namkhai Norbu C. The cristal and the way of light. Sutra, Tantra, and Dzogchen. Ithaca : NYUSA, Snow Lion Publications. 2000. P. 192.

19. Fuller R. Buckminster. Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking. Estate of R. Buckminster Fuller, 1979. Pp. 920–984.

20. Левченко О.Е. Освоение природы средствами сайнс-арта: «естественное» и «технологическое» : автореф. дис. канд. культ. М., 2016. С. 12.

21. Алексеев-Апраксин А.М., Соколов Б.Г. Метакультура: кластер и сеть. СПб. : Евразия, 2023. С. 127.

22. Талб Н.Н. Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости. М. : КоЛибри, 2009. С. 115.

23. Круглова М.Г., Гонтарь М.В. Культурологические аспекты развития современного художественного металла: от художественной традиции к художественной инновации // Шуйская сессия студентов, аспирантов, педагогов, молодых ученых : материалы XV Международной научной конференции / отв. редактор А.А. Червова. М. ; Иваново-Шуя : ИГУ 2022. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50125890>

Поступила в редакцию 30 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 января 2024 г.

Одобрена для публикации 20 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Мария Геннадьевна Круглова — кандидат культурологии, почетный деятель искусств г. Москвы, президент; Межрегиональная общественная организация «Союз кузнецов» России (МОО СК); 111033, г. Москва, Таможенный пр-д, д. 6; руководитель творческого объединения «Художественный металл»; Общероссийская общественная организация «Творческий союз художников России» (ТСХР); 125315, г. Москва, ул. Усиевича, д. 18, а/я 9; SPIN-код: 5022-8390, ORCID: 0000-0002-6343-6181; 7290101@mail.ru;

Александр Юрьевич Тихонов — член Союза московских архитекторов, член Московского Союза художников (Гильдия художественного проектирования), член творческого объединения «Художественный металл»; Общероссийская общественная организация «Творческий союз художников России» (ТСХР); 125315, г. Москва, ул. Усиевича, д. 18, а/я 9; старший преподаватель кафедры основ архитектуры и художественных коммуникаций; Национальный исследовательский университет «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6343-6181; aaalex958@mail.ru.

Вклад авторов:

Круглова М.Г. — научное руководство, концепция исследования, участие в разработке учебных программ и их реализации, написание исходного текста статьи, итоговые выводы.

Тихонов А.Ю. — сбор и обработка материала, развитие методологии, участие в реализации учебных программ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kruglova M.G. Russian creative economy — points of contact of design and art on the example of author's jewelery. *Theory and practice in the field of costume and fashion art (Integration into the business community) : Collection of materials of the scientific and practical round table. Moscow, Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art)*, 2023. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54346935> (rus.).

2. Losev A.F. *The history of ancient aesthetics*. Moscow, AST Publ. ; Kharkov, Folio Publ., 2000; 247-274. (rus.).

3. Kant I. (1724–1804). *Works*. V.F. Asmus, A.V. Gulyga, T.I. Oizerman (ed.). Moscow, Mysl Publ., 1963–1966; 67-89. (rus.).

4. Nosonov A.M. Theories of spatial development in socio-economic geography. *Pskov Journal of Regional Studies*. 2011; 11:3-16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16360774> (rus.).

5. Huntington S.P. *The clash of civilizations*. Trans. from the English by Yu. Novikov. Moscow ; Saint Petersburg, AST Publ., 2003; 72-80. (rus.).

6. Vizgalov D.V. *Branding of the city*. Moscow, Institute of City Economics, 2011; 76-82. (rus.).

7. Sliwotski A. *Migration of value: what will happen to your business the day after tomorrow?* Trans. from the English by A. Shaposhnikova. Moscow, Mann, Ivanov and Ferber Publ., 2006; 289-294. (rus.).

8. Kudryavtsev P.S. *Descartes' Cosmogony. History of Physics : Textbook*. 2nd ed., rev. and exp. Moscow, Enlightenment Publ., 1982; 47. (rus.).

9. Smith E.G. *The migrations of early culture*. Manchester, 1929; 73.

10. Dixon R.B. *The building of cultures*. 1928. New York, London : Charles Scribner's sons. URL: <https://archive.org/details/buildingofcultur00dixorich/page/n5/mode/2up>

11. Rogers E.M. *Diffusion of innovations*. New York : Free Press. 1962; 117.
12. Kruglova M.G. *Jewelry art as a marker of cultural diffusions (on the example of the interaction of cultures of Russia and the countries of the East) : Dissertation for the degree of Candidate of Cultural Studies*. Ivanovo, 2022; 210. (rus.).
13. Auger M. No place. *An Introduction to the Anthropology of Hypermodernity*. UFO, 1992; 13-19. (rus.).
14. Merleau-Ponty M. *Phenomenology of perception*. Trans. from the French I.S. Vdovina, S.L. Fokina (ed.). Saint Petersburg, Juventus, Nauka Publ., 1999; 132-191. (rus.).
15. Krashenninnikov A.V. *Cognitive urbanism: archetypes and prototypes of the urban environment*. Moscow, Kursk, 2020; 23-56. (rus.).
16. Demenova V.V. Lightness and light-form in Buddhist art (on the statement of the problem). *Izvestia. Ural Federal University Journal. Series 2. Humanities and Arts*. 2015; 1(136):62-74. (rus.).
17. Beer R. *Encyclopedia of Tibetan Symbols and ornaments*. Trans. from English. Hatches Bubenkova. Moscow, Orientalia Publ., 2011; XX:130-219.
18. Namkhai Norbu C. *The Cristal and the Way of Light. Sutra, Tantra, and Dzogchen*. Ithaca, NYUSA, Snow Lion Publications, 2000; 192.
19. Fuller R. Buckminster. *Synergetics. Explorations in the geometry of thinking*. Estate of R. Buckminster Fuller, 1979; 920-984.
20. Levchenko O.E. *Mastering nature by means of science art: "natural" and "technological" : abstract of the dissertation of the candidate of cultural studies*. Moscow, 2016; 12. (rus.).
21. Alekseev-Apraksin A.M., Sokolov B.G. *Meta-culture: cluster and network*. Saint Petersburg, Eurasia, 2023; 127. (rus.).
22. Taleb N.N. *Black Swan. Under the sign of unpredictability*. Moscow, KoLibri Publ., 2009; 115. (rus.).
23. Kruglova M.G., Gontar M.V. Culturological aspects of modern art metal development: from artistic tradition to artistic innovation. *Shuya Session of Students, Postgraduates, Teachers, Young Scientists : proceedings of the XV International Scientific Conference*. A.A. Chervova (ed.). Moscow ; Ivanovo-Shuya, 2022. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50125890> (rus.).

Received October 30, 2023.

Adopted in revised form on January 17, 2024.

Approved for publication on January 20, 2024.

B I O N O T E S : **Maria G. Kruglova** — Candidate of Cultural Studies, Honorary Artist of Moscow; President; **Interregional Public Organization "Union of Blacksmiths" of Russia (IPO UB)**; 6 Tamozhenny prospect, Moscow, 111033, Russian Federation; head of the creative association "Artistic Metal"; **All-Russian public organization "Creative Union of Artists of Russia" (TSHR)**; 18 Usievich street, a/z 9, Moscow, 125315, Russian Federation; SPIN-code: 5022-8390, ORCID: 0000-0002-6343-6181; 7290101@mail.ru;

Alexander Yu. Tikhonov — member of the Union of Moscow Architects, member of the Moscow Union of Artists (Guild of Artistic Design), member of the creative association "Artistic Metal"; **All-Russian public organization "Creative Union of Artists of Russia" (TSHR)**; 18 Usievich street, a/z 9, Moscow, 125315, Russian Federation; Senior lecturer at the Department "Fundamentals of Architecture and Artistic Communications"; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; aaalex958@mail.ru.

Contribution of the authors:

Maria G. Kruglova — scientific guidance, research concept, participation in the development of educational programs and their implementation, writing the source text of the article, final conclusions.

Alexander Yu. Tikhonov — collection and processing of material, development of methodology, participation in the implementation of educational programs.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 711.5:551.586:556.16

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.685-712

Фиторемедиационный потенциал озелененных территорий в городе

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Отклонение от средних температур в настоящее время составляет 1,5 °С. Если изменение климата продолжится и из-за антропогенного влияния температура воздуха поднимется до 3–4 °С, то аномально высокие тепловые волны будут возникать почти каждый год, принося с собой интенсивные медленно движущиеся ливни. Проведен обзор более 15 мировых программ по внедрению зеленой инфраструктуры в городах с момента появления этого термина в 1970-х годах и до настоящего момента. Все они имеют общие долгосрочные цели, совпадающие с рекомендациями Всемирной метеорологической организации и Управления Организации Объединенных Наций по снижению риска бедствий.

Материалы и методы. Авторы продолжают подробно исследовать перекресток Ленинского проспекта и улиц Лобачевского и Обручева в Москве. Кадастровая неустроенность территории исследования и создание особо охраняемой природной территории (ООПТ) «Ландшафтный заказник "Лес на реке Самородинке"» в 2020 г. создают дополнительные возможности для сбора ливневой воды и внедрения фиторемедиационных технологий.

Результаты. Выполнен анализ состояния ООПТ, прилегающей к территории исследования, отмечены растения, находящиеся под угрозой исчезновения и занесенные в Красную книгу. Приведен примерный перечень растений для использования в фиторемедиационных сооружениях.

Выводы. Необходимо использовать озелененные территории в городе для раскрытия фиторемедиационного потенциала. Правильно подобранные растения, устойчивые в городской среде, помогут оздоровить существующий природный ресурс, повысить узнаваемость городской среды и добавить в постоянное пользование новые социокультурные сценарии для жителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: умные ландшафты, зеленая инфраструктура, ландшафтная инфраструктура, дождевой сад, биоинженерные сооружения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Фиторемедиационный потенциал озелененных территорий в городе // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 685–712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.685-712

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

Phytoremediation potential of green spaces in the city

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

ABSTRACT

Introduction. The deviation from average temperatures is currently 1.5 °C. If climate change continues, and due to anthropogenic influence, air temperature rises to 3–4 °C, then abnormally high heat waves will occur almost every year, bringing with them intense slow-moving rains. A review of more than 15 global programmes to implement green infrastructure in cities from the inception of this term in the 1970s and up to the present has been carried out. All of them have common long-term goals that coincide with the recommendations of the World Meteorological Organization and the United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Materials and methods. The authors continue their detailed study of the intersection of Leninsky Prospekt and Lobachevsky and Obruchev streets in Moscow. The cadastral unsettledness of the research area and the creation of the specially protected area "Landscape Reserve "Forest on the Samorodinka River" in 2020 create additional opportunities for the collection of stormwater and implementation of phytoremediation technologies.

Results. The authors carried out an analysis of the state of protected areas adjacent to the research area, noted plants that are endangered and listed in the Red Book. The approximate list of plants for use in phytoremediation facilities is given.

Conclusions. It is necessary to use green areas in the city to reveal phytoremediation potential. Properly selected plants that are sustainable in the urban environment will help to improve the existing natural resource, increase the recognizability of the urban environment and add new socio-cultural scenarios for residents to permanent use.

KEYWORDS: smart landscapes, green infrastructure, landscape infrastructure, rain garden, bioengineering facilities

FOR CITATION: Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Phytoremediation potential of green spaces in the city. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):685-712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.685-712 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Климат Земли меняется, и большая часть наблюдаемого изменения связана с деятельностью человека. Это привело к перестройке температурных режимов, сопровождающихся скачком режима осадков. Острая потребность общества в решении проблем, связанных с воздействиями изменения климата на города и сельскохозяйственные территории, со смягчением риска бедствий и повышением устойчивости к ним, а также с обеспечением устойчивого развития на нашей планете, повышает важность климатических исследований. Увеличение объема дождевой воды, который должен освоить город, непосредственно влияет и на инженерную устойчивость городской территории, и на способность зеленой инфраструктуры к самоподдержанию.

Изменение климата уже привело к значительному увеличению интенсивных медленно движущихся ливней. По оценкам ученых [1], при потеплении на один градус по Цельсию содержание влаги в атмосфере увеличилось на 7 %. Этот температурный рекорд был установлен в июле 2017 г., однако в 2023 г. он был побит [2]. Отклонение от средних температур 1850–1900 гг., которые используются в качестве базовой климатической отметки, в настоящее время составляет 1,5 °C¹. «Этот доклад не означает, что мы навсегда превысим уровень в 1,5 °C, указанный в Парижском соглашении, которое касается долгосрочного потепления на протяжении многих лет. Тем не менее Всемирная метеорологическая организация (ВМО) выражает тревогу по поводу нарастания частоты временных превышений уровня в 1,5 °C», — заявил Генеральный секретарь ВМО профессор Петтери Таалас².

Согласно Шестому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (далее — МГЭИК)³, разогрев атмосферы, океана и суши произошел под влиянием человека. Первым этапом глобального потепления стало резкое развитие фабрик и заводов, вследствие чего средневзвешенная температура на планете Земля поднялась на 0,7 °C. В первой четверти XXI в. прибавка составила до 0,3 °C. Это существенно раскачало всю климатическую систему планеты. Воздушные массы стали больше передвигаться по оси юг-север. Горячий воздух с юга и холодный воздух с севера чаще и глубже проникают вдоль меридиа-

нов. И средняя температура складывается из гораздо больших колебаний, чем раньше, — считает лауреат Нобелевской премии мира 2007 г. за распространение научных знаний по проблеме изменения климата А. Кокорин⁴. Антропогенное изменение климата уже влияет на многие погодные и климатические экстремальные явления во всех регионах земного шара. Такие условия создали одни из самых серьезных проблем для физиологических порогов человека, общества и инфраструктуры, а также для окружающей среды.

Ученые отмечают, что изменение климата взаимодействует с такими глобальными тенденциями, как неустойчивое использование природных ресурсов, возрастающая урбанизация, социальное неравенство, потери и ущерб от экстремальных явлений и пандемии, ставя таким образом под угрозу будущее развитие человечества⁵.

Например, ежегодная глобальная стоимость деградации земли составляет около 300 млрд долл. США [3]. Только около 46 % этой суммы приходится на землепользователей, а остальные 54 % несут потребители экосистемных услуг за пределами сельскохозяйственного производства. Основная проблема заключается в том, что, хотя неблагоприятные климатические изменения происходят локально, потери и затраты на их корректировку являются глобальными. Так, несколько одновременных или последовательных негативных воздействий могут давать кумулятивный или каскадный эффекты и приводить к значительным потерям биоразнообразия и экосистемных услуг.

Если изменение климата продолжится, и из-за антропогенного влияния температура воздуха поднимется до 3–4 °C, то частота аномально высоких тепловых волн вырастет в 20 раз и будет возникать почти каждый год [4]. Таким образом в природе задержится избыточная тепловая энергия. Причем водяной пар относится к парниковым газам, так что возникает петля положительной обратной связи, усиливающая эффект.

Прогнозируемое учеными увеличение дефицита давления паров повлияет и на существующую взаимосвязь круговорота углерода, других минералов и воды на суше: усиление глобального потепления повлечет высыхание почвы [5] на территориях, где снижается количество среднегодовых осадков. Все эти процессы, вызванные антропогенными выбросами углерода, приводят у ряда ученых к опа-

¹ Парижское соглашение. 2015. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf

² ВМО опубликовала доклад «Состояние климата в Азии в 2023 году» // Климатический центр Росгидромета. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/novosti/sobytiya>

³ Изменение климата 2021 — физическая научная основа // Шестой оценочный доклад МГЭИК. 2021. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B#>

⁴ Как климатическая повестка изменит наш образ жизни. 2020. URL: <https://ru.valdaiclub.com/a/highlights/kak-klimaticheskaya-povestka-izmenit-nash-obraz-zhizni/>

⁵ Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

сениям по поводу будущего дефицита почвенного азота [6], что напрямую влияет на выживаемость растений на Земле.

Изменение климата напрямую влияет на градостроительство, где основным показателем эффективности реализованных решений становится успешное противостояние погодным условиям через инженерную подготовку территории и работу с поверхностной дождевой водой в структуре растительного биотопа.

Решения мирового сообщества по проблеме глобального потепления климата

Для борьбы с последствиями изменения климата человечество создало множество международных инициатив⁶, организаций^{7, 8} и усилий^{1, 9} по обнаружению, сопоставлению и обработке климатических данных и разработке планов создания более безопасного и устойчивого будущего для всех.

Согласно Конвенции по борьбе с опустыниванием¹⁰ Организации Объединенных Наций (ООН) с 2012 г. имеется шесть глобальных стратегий реагирования для сокращения неблагоприятного воздействия на окружающую среду:

- многофункциональный подход к земельным ресурсам;
- формирование устойчивости к внешним воздействиям;
- сельскохозяйственная деятельность, нацеленная на многочисленные преимущества;
- регулирование границ между сельскими и лесными районами с одной стороны, городскими и индустриальными территориями с другой;
- недопущение суммарных потерь из-за нерационального потребления природных ресурсов;
- создание благоприятных условий для сохранения биоразнообразия.

Так, ВМО и Управление ООН по снижению риска бедствий возглавляют инициативу заблаговременные предупреждения для всех¹¹ вместе с Международным союзом электросвязи и Международной

федерацией обществ Красного Креста и Красного Полумесяца, в которой также участвует Россия.

Эта программа предлагает климатическое, метеорологическое и гидрологическое обслуживание для предотвращения ущерба, а также выгодного сельскохозяйственного производства, коррекции работы воздушного, морского и наземного транспорта, туризма и различных предприятий.

Под климатическим обслуживанием в Глобальной рамочной основе для климатического обслуживания¹² (ГРОКО) понимается создание информационной климатической продукции (данные о прошлом, настоящем и будущем) и предоставление ее в виде цифровых массивов, картографического материала, аналитических обзоров и рекомендаций через средства коммуникации и презентации. Приоритетным для Российской Федерации в дополнение к пяти областям ГРОКО является климатическое обслуживание транспорта, строительства и городов¹³.

Экологический градостроительный подход вписывается в Конвенцию ООН о биологическом разнообразии¹⁴, где дается исчерпывающее понятие адаптации регионов к изменениям климата на основе экосистем — использование биоразнообразия и экосистемных функций и услуг для улучшения благосостояния общества.

В таких программах международного сотрудничества все отчетливее проявляется конвергенция между климатическим и экосистемными видами обслуживания. Стираются границы между отраслями, и это требует новых моделей взаимодействия, способных еще больше усилить эффект, возникающий в результате сближения. Например, выработка общего языка и поддержание непрерывного диалога между профессиональными климатологами, представителями «отраслевых» технических наук и субъектами адаптации¹⁵.

Основная цель адаптационных мер — предотвратить гибель или снижение продуктивности экосистем на значительных территориях. Так, используются две группы экосистемных функций: защитные (для защиты от неблагоприятных погодноклиматических явлений и их последствий, включая наводнения, почвенную эрозию и др.) и регулирую-

⁶ Инициативы по борьбе с изменением климата // Организация Объединенных Наций. 2023. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/climate-action-coalitions>

⁷ Саммит по целям в области устойчивого развития // Организация Объединенных Наций. 2019. URL: <https://www.un.org/ru/about-us/>

⁸ ВМО — специализированное учреждение ООН. 2022. URL: <https://public.wmo.int/ru/%D0%BE-%D0%BD%D0%B0%D1%81>

⁹ Декларация Рио-де-Жанейро по окружающей среде и развитию. 1992. URL: <https://docs.cntd.ru/document/8308082>

¹⁰ Земельные ресурсы: всемирный обзор. Первое издание. 2017. URL: https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2017-09/GLO_Full_Report_low_res_Russian.pdf

¹¹ ВМО и Инициатива раннего предупреждения для всех. 2022. URL: <https://public.wmo.int/en/earlywarningsforall>

¹² Глобальная рамочная основа для климатического обслуживания. 2014. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/442/groko.pdf>

¹³ Климатическое обслуживание // Климатический центр Росгидромета. 2022. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/obsluzhivanie>

¹⁴ Конвенция о биологическом разнообразии. 1992. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/biodiv.shtml

¹⁵ Ecumene 2022: Глобальный финансовый форум. URL: <http://voeikovmgo.ru/index.php/component/content/article/27-sobytiya/1134-ecumene-2022-globalnyj-finansovyj-forum>

шие (для создания комфортного микроклимата, поддержания гидрологического режима и др.) [7].

Например, сохраняя и правильно используя озелененные территории и водные объекты, т.е. внедряя «зеленую» и «голубую» инфраструктуры, города становятся устойчивее и разнообразнее. В Китае с 1997 г. создаются города-губки, очищающие загрязненную ливневую воду с помощью фильтрационных свойств растений. Пилотным проектом стал Пекинский парк биологических наук Чжунгуаньцунь, где построенные в 2000 г. водно-болотные угодья собирают дождевую воду [8]. В 2005 г. парк «Красная лента» помог превратить заброшенную и заросшую пойму в популярный городской парк, используя стратегию минимального вмешательства в сложившуюся экосистему. Развитие точечных проектов в национальную политику произошло после катастрофического ливня в Пекине в 2012 г., унесшего десятки жизней. В 2015–2017 гг. проектный институт при правительстве Китая TURENSCAPE реализовал крупномасштабные проекты по строительству губчатых городов в г. Санья и на о-ве Хайнань, представляя комплексное применение знаний и опыта ведущего проектного института Китая, накопленных за предыдущие 20 лет. Эти инновации обеспечили множество экосистемных преимуществ по сравнению с обычным городом, прерывающим природный ландшафт: обеспечение чистой водой, предотвращение засух и наводнений, пополнение запасов грунтовых вод, очищение почвы, сохранение и поддержание биоразнообразия, регулирование микроклимата, а также предоставление новой территории для отдыха и эстетического обогащения городских жителей [9]. Великолепной иллюстрацией такого подхода также является работа команды TURENSCAPE «Парк Фэнсян на реке Мэйше, Хайкоу», который в 2021 г. получил престижную награду ICONIC LANDSCAPE на конкурсе от Итальянской организации поддержки и развития ландшафтной архитектуры PAYSAGE¹⁶.

«Правильное» использование означает, что городские территории получают обратно свои природные свойства, созданные технологическими средствами инженерной подготовки и подбором соответствующего ассортимента растений, способных осаждать и фильтровать дождевую воду. Питание почвы и растений большим количеством воды происходит не только за счет атмосферных осадков, но и с помощью рационального использования ливневых вод. Это позволяет объектам зеленой инфраструктуры решать сразу несколько задач, в отличие от объектов «серой» инфраструктуры.

¹⁶ «Парк Фэнсян на реке Мейше в Хайкоу, Китай» и «Лесной парк Саньтайшань в Суцзяне, Китай» получили награду World Iconic Landscape Award! 2021. URL: <https://www.turenscape.com/news/detail/2113.html>

Специалисты разных направлений продолжают работать над развитием цивилизации в направлении устойчивого развития, и в этом процессе уже участвуют государственные, общественные и коммерческие структуры большинства развитых стран мира.

В 1998 г. многие страны Европы присоединились к Конвенции о защите окружающей среды посредством уголовного законодательства¹⁷, чтобы совместно проводить согласованную политику, направленную на защиту окружающей среды. Эта конвенция, заключенная в Страсбурге, является одним из немногих примеров внимания международного сообщества к мерам именно уголовно-правового характера в сфере защиты окружающей среды.

Другие не менее значимые мировые программы по внедрению зеленой инфраструктуры в городах представлены в табл. 1. Особый интерес вызывает программа 1982 г., проведенная в Париже под названием «Городской парк XXI века» [10], где основополагающим элементом стала ландшафтная инфраструктура. Для зарождающейся зеленой инфраструктуры этот термин стал прорывом, опережающим свое время: организация парка планировалась с учетом того, что диапазон его функций в будущем неизвестен и не определен. Ландшафт был выбран в качестве наиболее подходящей среды, с помощью которой можно постепенно упорядочивать программные и социальные изменения, особенно сложно эволюционирующие механизмы городской деятельности. Распространяя этот опыт по всему миру, следует учитывать разницу температур и объемов осадков для организации элементов зеленой инфраструктуры и корректировать под местные погодные условия и аборигенные виды растений.

Можно констатировать, что к началу XXI в. сложилась определенная концепция, отражающая современное представление мирового сообщества о путях и методах решения проблем изменения климата в городской среде. Характерно, что большинство из этих предложений были сформулированы и выдвинуты экологами, физиками, химиками, биологами, социологами и другими заинтересованными специалистами, общественными деятелями, но не градостроителями.

Особенности изменения климата на территории РФ

Россия также понимает свою ответственность за сохранение и поддержание как природных, так и городских территорий в устойчивом состоянии не только перед своими гражданами, но и перед всем человечеством, и поэтому является активным членом многих глобальных конвенций, регулирующих международные отношения в области окружающей среды.

¹⁷ Конвенция о защите окружающей среды посредством уголовного законодательства. 1998. URL: <https://rm.coe.int/168007f58b>

Табл. 1. Существующие мировые программы по внедрению зеленой инфраструктуры в городах и их общие долгосрочные цели

Table 1. Existing global programmes for the introduction of green infrastructure in cities and their common long-term goals

Начало программы Programme start	Страна Country	Наименование программы Name of the programme	Общие долгосрочные цели Common long-term goals
1969–2004	США USA	Экологическое управление ливневыми стоками [11] Ecological Stormwater Management (ESM) [11]	Моделирование различных режимов потока: заводь, подпитка, обратный поток и поверхностное взвешивание Modelling various flow regimes: backwater, surcharging, reverse flow, and surface ponding
1979–1983		Общенациональная программа по очистке городских стоков ¹⁸ Nationwide Urban Runoff programme ¹⁸	Испарение стоячих поверхностных вод Evaporation of standing surface water
1990		Технология экологически щадящего подхода к дизайну территории ¹⁹ Low Impact Design (LID) ¹⁹	Увеличение инфильтрации воды в почву Increased infiltration of water into the soil
1999		Зеленый город, чистые воды ²⁰ Greenworks Philadelphia ²⁰	Очищение грунтовых вод Groundwater purification
2003		Естественные дренажные системы в Сиэтле ²¹ Natural Drainage Systems in Seattle ²¹	Взаимодействие между грунтовыми водами и дренажной системой Interflow between groundwater and the drainage system
1982	Европейский союз European Union	Городской парк XXI в. [12] City Park of the XXI century [12]	Создание ландшафтной инфраструктуры Creation of landscape infrastructure
1985		Самоочищающаяся биосистема для плавательных прудов «Биотоп» [13] Self-cleaning biosystem for swimming ponds “Biotop” [13]	Повышение биоразнообразия городских экосистем Increasing the biodiversity of urban ecosystems
2013–2017		Экологизация экономики в странах Восточного партнерства ЕС ²² Greening the economy in the EU Eastern Partnership countries (EaP GREEN) ²²	Сохранение природных водоемов, водоразделов, береговых линий и естественная защита пойменных пространств Conservation of natural reservoirs, watersheds, coastlines and natural protection of floodplain spaces
2020		Зеленый пакт ²³ The European Green Deal ²³	Улучшение качества воздуха Improving air quality
1997	Китай China	Города-губки [14] Sponge-cities [14]	Улучшение капитальных строений Improvement of capital buildings

¹⁸ Results of the Nationwide Urban Runoff Programme. Vol. 1. Final report, EPA. Washington D.C., USA, 1983. 198 p. URL: https://www3.epa.gov/npdes/pubs/sw_nurp_vol_1_finalreport.pdf

¹⁹ Revising Local Codes to Facilitate Low Impact Development. Creating LID–Local Development Code Connections Will Assist With Implementation, EPA. Washington D.C., USA, 2021. 8 p. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-06/documents/lid_fact_sheet_codes_june_2021_508.pdf

²⁰ Greenworks Philadelphia. Greenworks 2021 Year in Review. Philadelphia, USA, 2022. 64 p. URL: <https://www.phila.gov/media/20220421120407/OOS-Greenworks-Review-2022.pdf>

²¹ Seattle’s Natural Drainage Systems. Seattle, USA, 2013. P. 20. URL: https://nacto.org/docs/usdg/seattle_natural_xdrainage_systems_seattle.pdf

²² Progress in the implementation of resolution 5.2 on the application of the principle of equitable geographical distribution within the recruitment strategy of the United Nations Environment Programme. Nairobi, 2022. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/38005>

²³ Climate action and the Green Deal. The European Climate Law, European Union. 2020.

Начало программы Programme start	Страна Country	Наименование программы Name of the programme	Общие долгосрочные цели Common long-term goals
2000	Австралия Australia	Городской дизайн, чувствительный к воде ²⁴ Water Sensitive Urban Design (WSUD) ²⁴	Улучшение качества воды Improving water quality
2004	Новая Зеландия New Zealand	Управление ливневыми водами на месте ²⁵ Onsite Stormwater Management ²⁵	Сокращение объема ливневых стоков Reducing the volume of storm drains
2006	Сингапур Singapore	Активные, красивые, чистые воды ²⁶ Active, beautiful, clean waters (ABC waters) ²⁶	Снижение опасности затопления Reducing the risk of flooding
2008	Южная Корея South Korea	Зеленый новый курс ²⁷ Green New Deal ²⁷	Сохранение открытых пространств Preservation of open spaces
2015	Великобритания Great Britain	Устойчивые дренажные системы ²⁸ Sustainable Drainage Systems (SuDS) ²⁸	Сбор дождевой воды Rainwater harvesting
2021	Бразилия Brazil	Национальная программа зеленого роста ²⁹ National Green Growth Programme ²⁹	Экономическое развитие региона для привлечения дополнительных инвестиций Economic development of the region to attract additional investments
2021	Россия Russia	Дождевой сад при низкой температуре ³⁰ Rain garden at low temperature ³⁰	Использование природных материалов, обладающих поглотительными и ионообменными свойствами The use of natural materials with absorption and ion-exchange properties
2022		Зеленый стандарт — система сбора дождевой воды ³¹ Green Standard — rainwater collection system ³¹	Генеральное планирование систем сбора канализационных стоков и оценка систем городских водосборных бассейнов Master planning of sewage collection systems and assessment of urban catchment basin systems

²⁴ What is Water Sensitive Urban Design (WSUD)? Water by design. 2020. URL: <https://waterbydesign.com.au/wsud>

²⁵ On-Site Stormwater Management Guideline. Wellington, New Zealand. 2004. P. 239. URL: https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=2967

²⁶ Active, Beautiful, Clean Waters Programme, Singapore’s National Water Agency. 2020. URL: <https://www.pub.gov.sg/abc-waters/about>

²⁷ South Korea’s Green New Deal: A Very Big Deal for Australia, Asia Society. 2022. URL: <https://asiasociety.org/node/30643/south-koreas-green-new-deal-very-big-deal-australia#:~:text=The%20K%2DNew%20Deal%20comprised,billion%20from%20the%20private%20sector>

²⁸ An Introduction to Sustainable Drainage Systems (SuDS), The Flood Hub. 2021. URL: <https://thefloodhub.co.uk/wp-content/uploads/2018/09/An-Introduction-Sustainable-Drainage-Systems-SuDS-booklet.pdf>

²⁹ BRAZIL: Federal government launches Green Growth National Programme, Trench Rossi Watanabe. 2021. URL: <https://www.trenchrossi.com/en/legal-alerts/brazil-federal-government-launches-green-growth-national-programme/>

³⁰ В России проектируют первые дождевые сады, Рамблер новости. 2021. URL: https://news.rambler.ru/tech/46358484/?utm_content=news_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink

³¹ ГОСТ Р 70319–2022. «Зеленые» стандарты. Система сбора дождевой воды: очистка, хранение, использование. 2022. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200193005>

Современное глобальное потепление, отчетливо выраженное на территории России, имеет ряд важных особенностей. В последние десятилетия изменения границ биомов во многих регионах РФ продолжают идти в направлении, определяемом парниковым эффектом — на север на равнине и вверх в горах, — докладывает старший научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, профессор Альпийского университета Гренобля О. Золина³². Деградация вечной мерзлоты под воздействием климата способна кардинально повлиять на жизнедеятельность населения Арктики, — предупреждает заведующий отделом исследований изменений климата государственного гидрологического института О. Анисимов³³. По фрагментарным подтверждениям скорость таких изменений на европейской территории России в среднем выше, чем на азиатской³⁴. Хотя по климатическим показателям границы уже не соответству-

ют господствующему типу растительности, фактические их сдвиги происходят медленно.

Рост содержания водяного пара в атмосфере при повышении температуры потенциально способствует росту осадков, в особенности экстремальных осадков. Так, в середине XX в. проливные и обложные дожди на юге Дальнего Востока России приносили по 200–250 мм осадков в год. Сейчас ситуация стала радикально иной — доля ливней выросла почти в два раза и достигла 350 мм [15]. Также парниковый эффект повлиял и на резкое повышение температуры воды в Черном море, создав новый тип «круговорота» воды в атмосфере, похожий на тропический, что проявилось в виде проливных дождей на юге европейской части России³⁵. В среднем по территории России увеличение количества осадков диагностируется в интервале 1976–2020 гг. как для годовых сумм (рис. 1), так и для сумм осадков в отдельные вегетационные сезоны³⁶.

На рис. 1 хорошо заметно увеличение количества осадков относительно нормы именно с начала 2020-х гг., когда эффект от глобального потепления стал заметен не только по статистике, но и невоору-

³² Онлайн-конференция в МИА «Россия сегодня» — глобальное изменение климата. 2021. URL: <https://ru.scientificrussia.ru/articles/onlajn-konferencia-v-mia-rossia-segodna-globalnoe-izmenenie-klimata>

³³ Эксперты решают, как спасти уникальные экологические системы Севера. 2018. URL: <https://tass.ru/v-strane/4920602>

³⁴ Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы : материалы междунар. науч.-практ. конф. Воронеж : Цифровая полиграфия, 2019. Т. 2. 444 с. URL: http://www.geogr.vsu.ru/NIR/Konferencii_fakylteta/T2.pdf

³⁵ Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // Росгидромет. СПб : Научно-технологические, 2022. 676 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2022/od3.pdf>

³⁶ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год // Росгидромет. М., 2023. 104 с. URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/climate/rus-clim-annual-report.pdf>



Рис. 1. Изменения годовых сумм осадков на территории России в % от нормы (рисунок авторов)

Fig. 1. Changes in annual precipitation amounts on the territory of Russia in % of the norm (authors' figure)

женным глазом городского жителя. Эти изменения необходимо учитывать в разных отраслях, например, разница увлажнения почвы важна для сельского хозяйства, — поясняет А. Чернокульский из Института физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН в Москве³⁷, — изменение климата необходимо держать в уме и в городском планировании. Так, в Москве наблюдается повторяемость наиболее интенсивных осадков, которая за последние годы стала на 11,6 % выше фоновой [16].

Таким образом, становится очевидна необходимость использования атмосферных осадков для полива городских зеленых насаждений. Первая в России система сбора дождевой воды для полива растений появилась в «Аптекарском огороде» Ботанического сада Московского государственного университета в 2018 г.³⁸ Однако она собирает осадки с крыши оранжерей, не используя сток с дорожек. Через четыре года этот успешный опыт экстраполировали на федеральный уровень. В 2022 г. был принят «зеленый» стандарт³¹ — новый ГОСТ для сбора, очистки, хранения и использования дождевой воды. По этому нормативному документу неочищенный дождевой сток с предварительной проверкой качества можно применять для орошения почвы, чтобы обеспечить питание подземных вод. Следующим этапом рационального использования дождевой воды служит дождевой сад — естественный фильтр для дождевого стока на основе биоремедиационных технологий. Такие экологические технологии, как дождевые сады, уже 40 лет являются ключевым элементом устойчивой системы городского дренажа.

Изучение всех этих климатических и физических процессов, как надеются ученые, поможет понять, как будет меняться ситуация в будущем на территории РФ и какие действия стоит предпринять для предотвращения затопления и улучшения экологической ситуации в городах. Сохранение и восстановление естественных экосистем градостроительными средствами должно быть приоритетным инструментом в борьбе с изменением климата.

Адаптация растений к климатическому кризису

Наибольший интерес вызывает адаптация растений к глобальному потеплению, ведь они неспособны активно передвигаться или скрываться от действия высоких температур.

Период с 2021 по 2030 г. объявлен десятилетием ООН по восстановлению экосистем. Одно из действий, провозглашенных в программе: «Менять поведение». Нельзя перейти к устойчивому развитию, сохраняя нынешние стереотипы мыш-

ления³⁹. Одним из таких вредных шаблонов было убеждение, что растения только «рады» повышению CO₂ и «с удовольствием» поглощают его, останавливая глобальное потепление. Исследование ученых из Китая после проведения тщательного анализа данных с наземных мониторов по всему миру за 1982–2016 гг. зафиксировало рост уровня CO₂ и в то же время снижение скорости фотосинтеза растений [17]. В глобальном масштабе этот эффект может отвечать за 16 % от общей величины потепления климата над сушей, а для восточной части Азии и Северной Америки эта цифра может составлять до 25 %.

Этот же эффект будет отвечать за повышенные стоки в ливневую канализацию и водоемы, которые пополнятся не только из-за увеличения количества осадков, но и из-за того, что больше воды станет проходить этот цикл, минуя систему испарения растений. Ученые [18] называют это интенсификацией гидрологического цикла, что приведет к снижению относительной влажности воздуха и повышению дефицита давления пара. «Отклик растений на изменение концентрации углекислого газа и влажности воздуха очень важен для корректности климатических прогнозов. Все зависит от типа растительности, покрывающей сушу. Мы должны с очень большой осторожностью вмешиваться в экосистемы и леса, так как это может иметь серьезные климатические последствия», — подытожил профессор факультета наук о земной системе Стэнфордского университета Кен Калдейра⁴⁰.

Климат внутри любого города отличается от климата прилегающих территорий из-за обилия непроницаемых поверхностей и плотной застройки. В результате изменяется циркуляция воздуха, за ней — температурный режим, и возникает городской остров тепла — значительно ускорившееся изменение климата в сторону потепления [19]. Так, потепление климата сдвинуло сроки смены сезонов и изменило их продолжительность, что повлияло на период созревания листьев на деревьях. На разных этапах жизни у растений меняется интенсивность фотосинтеза и способность ассимилировать атмосферный углерод [20]. Ученые предполагают, что цветение и появление первых листьев весной будет ускоряться на 5–6 дней в году при повышении средней температуры на каждый градус Цельсия, а каждый дополнительный день вегетации означает поглощение от 3 до 9,8 г углерода на 1 м² леса [21]. В городах эти явления заметны сильнее даже для обычного жителя, ведь процент запечатанных территорий высок, а зеленые насаждения

³⁷ Александр Чернокульский: Через 50 лет борьба за климат обойдется дороже. 2020. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/5e7dbde09a7947b827f4d14e>

³⁸ В «Аптекарском огороде» запустили первую в России систему сбора дождевой воды. 2018. URL: <https://www.asi.org.ru/news/2018/10/18/aptekarskij-ogorod-dozhd/>

³⁹ О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию : Указ Президента Российской Федерации от 01.04.1996 № 440.

⁴⁰ Геоинженерия климата. Наука, управление и неопределенность. 2009. URL: https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf

сконцентрированы в отдельных городских парках и не могут нормализовать температуру на всей территории города.

После очередной температурной волны 2019 г. власти Парижа обнаружили, что город остро нуждается в зеленых насаждениях, которые могут создавать тень⁴¹. Оказалось, что деревья в столице Франции занимают только 10 % площади города. Из-за отсутствия тени температура на открытых участках городских пространств поднимается до 56 °С, хотя в «зеленом» пригороде она держится на отметке 28 °С. Разница в наблюдаемых тенденциях потепления между городами и их окрестностями частично объясняется урбанизацией: геометрия города снижает интенсивность природной вентиляции территорий, промышленность и другая антропогенная деятельность повышают общую температуру города. В то время как менее плотно застроенные территории с большим количеством зеленых насаждений и водными объектами не имеют эффекта городского теплового острова. Схожую проблему наблюдают и жители Санкт-Петербурга⁴² — в городе не хватает деревьев, мало новых посадок. Отчасти это из-за трудностей в согласовании проекта посадок, корни деревьев могут повредить существующие инженерные коммуникации, проложенные под землей.

Инженерная инфраструктура в нормативной практике РФ

Градостроительство прямо связано с инженерной подготовкой и защитой территории, в которой нормативные документы дают ряд ограничений для высадки новых растений и использования поверхностной воды. В настоящее время нормативными документами СанПиН 2.1.5.980–00⁴³, СанПиН 1.2.3685–21⁴⁴ и ФЗ № 52⁴⁵ определены нормативы сброса сточных вод (СВ) в канализацию, а также даны количественные показатели допустимого со-

держания разных химических составов. Основным критерием проверки является состояние воды в водоеме, куда сбрасывается очищенная вода. То есть ливневый сток с автомобильных дорог и тротуаров по существующим правилам нельзя перенаправлять на зеленые насаждения в городе. Эти запреты были продиктованы предельно допустимой концентрацией (ПДК) — ливневые стоки должны иметь минимальное количество вредных примесей, в то время как на самом деле стоки загрязнены нефтепродуктами и взвешенными веществами. Таким образом, весь ливневый сток по нормативным документам должен быть отведен в канализацию.

По расчетам авторов [22], только 20 % ливневого стока уходит в канализацию. Из оставшегося количества ливневой воды на поверхности дорог и тротуаров половина испаряется, поднимая в воздух «вредные» частицы, а другая половина все равно проходит поверхностную и глубокую инфильтрацию, несмотря на несоответствие ПДК. Очевидно, что канализация и ливневки, представляющие «серую инфраструктуру», не справляются с увеличившимися в результате глобального потепления атмосферными осадками.

Проблема очистки поверхностных стоков во многих случаях заключается в нестабильности состава и характера загрязняющих веществ (ЗВ) [23]. Однако нормативными документами РФ не предусматривается использование следующих способностей растений:

- фильтровать воду и способствовать оседанию взвешенных веществ;
- поглощать биогенные элементы и некоторые органические вещества;
- накапливать некоторые металлы и органические вещества, которые трудно разлагаются;
- окислять и в процессе фотосинтеза обогащать воду кислородом;
- преобразовывать токсичные вещества в нетоксичные.

Для осуществления этих функций растениями необходимо создать условия в городе: не обустривать дороги бордюрами, собирать ливневый сток в траншеи и высадить высшие водные растения. Их стойкость к воздействию больших концентраций ЗВ и взаимодействие с биоценозом микроорганизмов позволяет успешно очищать СВ в мире без применения систем хлорирования или озонирования воды [24–26].

В городе нужны системы открытого дренажа для сбора, хранения и перераспределения ливневых вод. Другие нормативные документы РФ, в которых упоминается дренаж, приведены в табл. 2.

В результате проведенного анализа авторами были найдены упоминания «дренажа» в существующих законодательно закрепленных правилах РФ, которые относятся к выбору, проектированию и порядку выполнения работ по устройству дренажа

⁴¹ Heatwave in Paris exposes city's lack of trees. 2022. URL: <https://www.reuters.com/world/europe/heatwave-paris-exposes-citys-lack-trees-2022-08-04/>

⁴² Эксперты рассказали, почему в Петербурге становится все меньше деревьев. 2022. URL: <https://nsp.ru/32764-eksperty-rasskazali-pocemu-v-peterburge-stanovitsya-vsemense-derevev>

⁴³ СанПиН 2.1.5.980–00. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. 2001. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006938>

⁴⁴ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. Постановлением главного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2. 2022. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>

⁴⁵ О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : Федеральный закон. 2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901729631>

Табл. 2. Дренаж в нормативных документах России
Table 2. Drainage in regulatory documents of Russia

Нормативный документ РФ Regulatory document of the Russian Federation	Раздел Section	Содержание Content
ОДМ 218.2.055–2015 «Рекомендации по расчету дренажных систем дорожных конструкций» ⁴⁶ Industry road methodological document of the IRMD 218.2.055–2015 “Recommendations for the calculation of drainage systems of road structures” ⁴⁶	3. Термины и определения, обозначения и сокращения 3. Terms and definitions, designations and abbreviations	3.19. Дренаж : естественное или искусственное удаление воды с поверхности земли и поступающей грунтовой воды к сооружению 3.19. Drainage : natural or artificial removal of water from the surface of the earth and incoming groundwater to the structure
		3.20. Дренаж горизонтальный: система трубчатых дрен, канав, лотков 3.20. Horizontal drainage : a system of tubular drains, ditches, trays
		3.21. Дренаж комбинированный: система, сочетающая горизонтальную дренаж с рядом вертикальных дренажных колодцев. Применяют ее в тех случаях, когда один вертикальный или один горизонтальный дренаж не может обеспечить требуемого перехвата подземных вод 3.21. Combined drainage : a system combining horizontal drainage with a number of vertical drainage wells. It is used in cases where one vertical or one horizontal drainage cannot provide the required interception of groundwater
		3.22. Дренаж комбинированный плоскостной (многослойный композиционный дренирующий материал, дренажный геомат, дренажный геокомпозит, плоская геодрена): комбинированный геосинтетический материал в определении ГОСТ Р 55028, включающий слой (слои) нетканого геотекстильного материала, выполняющего роль фильтра, и слой, формирующий объемную структуру геосинтетического материала — дренажное ядро (геомат, георешетка, геосетка, геопластмасса) и выполняющий функции дренирования дорожных конструкций 3.22. Combined planar drainage (multilayer composite drainage material, drainage geomat, drainage geocomposite, flat geodrene): Combined geosynthetic material as defined by GOST R 55028, including a layer (layers) of non-woven geotextile material acting as a filter, and a layer forming a volumetric structure of geosynthetic material — drainage core (geomat, geogrid, geogrid, geoplastics) and performing the functions of drainage of road structures
		3.23. Дренажная система : система инженерных сооружений, предназначенная для понижения уровня подземных вод и их отвода 3.23. Drainage system : A system of engineering structures designed to lower the level of groundwater and drain it
		3.24. Дренажная труба : труба, предназначенная для точечного сбора ливневых и сточных вод из дренажных каналов и сброса их в систему водоотведения моста 3.24. Drainage pipe : A pipe designed for spot collection of stormwater and wastewater from drainage channels and their discharge into the drainage system of the bridge
	4. Основные положения 4. Main statements	4.1. Документ содержит нормы и указания по конструированию и расчету дренажных конструкций одежд автомобильных дорог общего пользования. Им следует пользоваться при: проектировании дренажных конструкций одежд на вновь сооружаемых дорогах и на участках реконструируемых дорог 4.1. The document contains standards and guidelines for the design and calculation of drainage structures for public roads. They should be used when: designing drainage structures of clothing on newly constructed roads and on sections of reconstructed roads
		4.2. Документ не распространяется на проектирование понижающего и перехватывающего дренажа 4.2. The document does not apply to the design of lowering and intercepting drainage

⁴⁶ Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.055–2015. Рекомендации по расчету дренажных систем дорожных конструкций. 2015. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200125026>

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Нормативный документ РФ Regulatory document of the Russian Federation	Раздел Section	Содержание Content
СП 104.13330.2011 «СНиП 2.06.15–85 Инженерная защита территории от затопления и подтопления» ⁴⁷ СР 104.13330.2011 “SNiP 2.06.15–85 Engineering protection of the territory from flooding and flooding” ⁴⁷	3. Требования к проектированию объектов и сооружений инженерной защиты 3. Requirements for the design of engineering protection facilities and structures	3.1. В состав средств инженерной защиты от затопления могут входить: дамбы обвалования, дренажи, дренажные и водосбросные сети, нагорные водосбросные каналы, быстротоки и перепады, трубопроводы и насосные станции 3.1. Engineering flood protection equipment may include: collapse dams, drains, drainage and spillway networks, upland spillway channels, rapid flows and drops, pipelines and pumping stations
		3.23. При выборе систем дренажных сооружений должны быть учтены форма и размер территории, требующей дренирования, характер движения грунтовых вод, геологическое строение, фильтрационные свойства и емкостные характеристики водоносных пластов, область распространения водоносных слоев с учетом условий питания и разгрузки подземных вод, определены количественные величины составляющих баланса грунтовых вод, составлен прогноз подъема уровня грунтовых вод и снижения его при осуществлении защитных мероприятий 3.23. When choosing drainage systems , the shape and size of the territory requiring drainage, the nature of groundwater movement, geological structure, filtration properties and reservoir characteristics of aquifers, the area of distribution of aquifers, taking into account the conditions of groundwater supply and discharge, the quantitative values of the components of the groundwater balance are determined, the forecast of groundwater level rise is made of water and its reduction in the implementation of protective measures
	5. Защитные сооружения. Дренажные системы и дренажи 5. Protective structures. Drainage systems and drains	5.20. При проектировании дренажных систем предпочтение следует отдавать системам дренажа с отводом воды самотеком . Дренажные системы с принудительной откачкой воды требуют дополнительного обоснования. В зависимости от гидрогеологических условий надлежит применять горизонтальные, вертикальные и комбинированные дренажи 5.20. When designing drainage systems , preference should be given to drainage systems with gravity drainage . Drainage systems with forced pumping of water require additional justification. Depending on the hydrogeological conditions, horizontal, vertical and combined drains should be used
		5.25. Открытые дренажные каналы и траншеи следует устраивать в тех случаях, когда требуется осушение значительных по площадям территорий с одно-, двухэтажной застройкой небольшой плотности. Их применение также возможно и для защиты от подтопления наземных транспортных коммуникаций 5.25. Open drainage channels and trenches should be arranged in cases where drainage of large areas with one- and two-storey buildings of low density is required. Their use is also possible to protect against flooding of land transport communications
		5.28. Сброс дренажных вод в ливневую канализацию допускается, если пропускная способность ливневой канализации определена с учетом дополнительных расходов воды, поступающей из дренажной системы. При этом подпор дренажной системы не допускается 5.28. Discharge of drainage waters into the storm sewer is allowed if the capacity of the storm sewer is determined taking into account the additional costs of water coming from the drainage system. At the same time, the drainage system is not allowed to be backed up

⁴⁷ СП 104.13330.2011. СНиП 2.06.15–85 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления». 2011. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/a7d/sp-104.pdf>

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Нормативный документ РФ Regulatory document of the Russian Federation	Раздел Section	Содержание Content
Типовая технологическая карта (ТТК) «Устройство дренажа мелкого заложения» ⁴⁸ Typical technological map (TTM) “Shallow drainage device” ⁴⁸	II. Общие положения II. General terms and conditions	2.3. В состав работ, последовательно выполняемых при устройстве дренажа мелкого заложения, входят следующие технологические операции: • геодезические разбивочные работы; • устройство смотровых колодцев; • отрывка дренажной траншеи; • устройство песчаной подготовки; • подготовка дренажных труб; • укладка дренажных труб в траншею; • испытание дренажной системы; • обратная засыпка траншеи дренирующим грунтом 2.3. The work performed sequentially during the installation of shallow drainage includes the following technological operations: • geodetic center work; • installation of inspection wells; • a fragment of a drainage trench; • sand preparation device; • preparation of drainage pipes; • laying drainage pipes in a trench; • testing of the drainage system; • backfilling of the trench with draining soil
	III. Организация и технология выполнения работ III. Organization and technology of work	3.3.1. Дренаж — естественное либо искусственное удаление воды с поверхности земли, либо подземных вод. Земля часто нуждается в отводе грунтовых либо ливневых вод для улучшения агротехники, строительства зданий и сооружений. Дренаж в строительстве — метод сбора и отвода грунтовых вод от участка и сооружений с помощью системы дренажных труб, скважин, каналов, подземных галерей и других устройств. Для понижения уровня грунтовых вод устраивают дренажи мелкого и глубокого заложения, откосные дренажи на автомобильных дорогах, дренажи на промышленных предприятиях и в жилищном строительстве 3.3.1. Drainage is the natural or artificial removal of water from the surface of the earth or groundwater. The land often needs the drainage of groundwater or stormwater to improve agricultural technology, construction of buildings and structures. Drainage in construction is a method of collecting and diverting groundwater from a site and structures using a system of drainage pipes, wells, channels, underground galleries and other devices. To lower the groundwater level, shallow and deep drains, slope drains on highways, drains at industrial enterprises and in housing construction are arranged 3.3.2. Дренажи мелкого заложения применяют в городах с развитой водосточной сетью. Дренаж мелкого заложения служит для: • понижения уровня грунтовых вод путем отвода из почвы лишней влаги; • осушения песчаного подстилающего слоя и обеспечения устойчивости дорожного покрытия; • сброса атмосферных осадков с плоскостных конструкций, таких как газоны, площадки спортивных сооружений 3.3.2. Shallow drains are used in cities with a developed drainage network. Shallow drainage is used for: • lowering the groundwater level by removing excess moisture from the soil; • drainage of the sandy underlying layer and ensuring the stability of the road surface; • precipitation discharge from planar structures such as lawns, playgrounds of sports facilities

⁴⁸ Типовая технологическая карта (ТТК). Устройство дренажа мелкого заложения. 2007. URL: <https://docs.cntd.ru/document/450703085>

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Нормативный документ РФ Regulatory document of the Russian Federation	Раздел Section	Содержание Content
СП 50-101–2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений» ⁴⁹ CP 50-101–2004 “Design and installation of foundations and foundations of buildings and structures” ⁴⁹	11. Проектирование водопонижения и гидроизоляции 11. Design of water treatment and waterproofing	11.1.1. Для защиты подземных сооружений и котлованов от подземных вод в периоды строительства и (или) эксплуатации применяют искусственное понижение уровня подземных вод с применением водоотлива, водопонижительных скважин, иглофильтров, электроосмоса и дренажа 11.1.1. To protect underground structures and pits from groundwater during construction and (or) operation, artificial lowering of the groundwater level is used using drainage, water-lowering wells, needle filters, electroosmosis and drainage
		11.1.15. Дренажи подразделяют на общие (головной, береговой, отсечной и систематический) и местные (локальные) (кольцевой, пристенный и пластовый) 11.1.15. Drains are divided into general (head, shore, cut-off and systematic) and local (local) (ring, wall and reservoir)
		11.1.18. Траншейный дренаж допускается устраивать на свободных от застройки территориях. Закрытый беструбчатый дренаж (траншеи, заполненные фильтрующим материалом) следует предусматривать, как правило, для кратковременной эксплуатации (на оползневых склонах в период осуществления мероприятий по их стабилизации, в котловане в период строительства сооружения и т.п.) 11.1.18. Trench drainage is allowed to be arranged in areas free from development. Closed tubeless drainage (trenches filled with filter material) should be provided, as a rule, for short-term operation (on landslide slopes during the implementation of measures to stabilize them, in a pit during the construction of a structure, etc.)
СП 120.13330.2022 «Метрополитены» ⁵⁰ CP 120.13330.2022 “Underground” ⁵⁰	5.4. Станции, перегонные тоннели, притоннельные сооружения 5.4. Stations, distillation tunnels, tunnel structures	5.4.1.7. Дренажные лотки необходимо выполнять вдоль обделки наклонных ходов в уровне ступеней, вдоль стен под траволаторами, а также вдоль стен подземных сооружений, через которые возможно поступление грунтовых вод, в том числе в служебных помещениях и натяжной камере эскалаторов. В пассажирских помещениях дренажные лотки должны быть расположены за облицовкой стен 5.4.1.7. Drainage trays must be carried out along the lining of inclined passages at the level of steps, along the walls under the travolators, as well as along the walls of underground structures through which groundwater can flow, including in office premises and the tension chamber of escalators. In passenger areas, drainage trays should be located behind the wall cladding
ГОСТ Р 59433–2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Сооружения защитные от воздействия воды. Общие технические требования» ⁵¹ GOST R 59433–2021 is the national standard of the Russian Federation “Public roads. Structures that protect against the effects of water. General technical requirements” ⁵¹	3. Термины и определения 3. Terms and definitions	3.11. Дренаж : устройство для частичного или полного перехвата фильтрационного потока в основании или внутри водоподпорного сооружения, сбора и отвода профильтровавшихся вод 3.11. Drainage : a device for partially or completely intercepting the filtration flow at the base or inside a water support structure, collecting and discharging filtered water 3.12. Дренажная система автомобильной дороги: система инженерных сооружений дорожной одежды, земляного полотна и грунтового основания дороги, предназначенная для частичного или полного перехвата фильтрационного потока, его сбора и отвода, а также понижения уровня подземных вод 3.12. Drainage system of a highway: A system of engineering structures of the pavement, the roadbed and the dirt base of the road, designed to partially or completely intercept the filtration flow, collect and divert it, as well as lower the groundwater level

⁴⁹ СП 50-101–2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. 2004. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200038307>
⁵⁰ СП 120.13330.2022. Метрополитены. 2022. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300886470>
⁵¹ ГОСТ Р 59433–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Сооружения защитные от воздействия воды. Общие технические требования. 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200179230>

Нормативный документ РФ Regulatory document of the Russian Federation	Раздел Section	Содержание Content
СП 250.1325800.2016 «Здания и сооружения. Защита от подземных вод» ⁵² СР 250.1325800.2016 “Buildings and structures. Protection from groundwater” ⁵²	3. Термины и определения 3. Terms and definitions	3.17. Дренажная система: инженерно-техническое сооружение, предназначенное для сбора и удаления подземных вод 3.17. Drainage system: an engineering and technical structure designed to collect and remove groundwater
	6.3. Математическое моделирование геофильтрации 6.3. Mathematical modelling of geofiltration	6.3.2.2. При моделировании в пределах небольших по размеру зон влияния водопонижительных или дренажных мероприятий , когда формирование водопритоков и воронки депрессии в основном определяется геофильтрационными параметрами, полученными на площадке строительства, верификацию геофильтрационной модели, построенной для решения «в понижениях», допускается не проводить 6.3.2.2. When modelling within small-sized zones of influence of water-lowering or drainage measures , when the formation of water flows and depression funnels is mainly determined by geofiltration parameters obtained at the construction site, verification of the geofiltration model built to solve “in depressions” is not allowed
СП 42.13330.2016 «Градостроительство» ⁵³ СР 42.13330.2016 “Urban Planning” ⁵³	9. Зоны рекреационного назначения 9. Recreational areas	9.6. Расстояние от зданий и сооружений, а также объектов инженерного благоустройства до деревьев и кустарников для дренажа принимают 2 метра 9.6. The distance from buildings and structures, as well as engineering facilities, to trees and shrubs for drainage is 2 meters
	12. Инженерная инфраструктура. Дождевая канализация 12. Engineering infrastructure. Rainwater drainage	12.12. Система водоотвода поверхностных вод должна учитывать возможность приема дренажных вод из сопутствующих дренажей , теплосетей и общих коллекторов подземных коммуникаций. Поступление в дождеприемные колодцы незначительных по объему вод от полива замощенных территорий и зеленых насаждений в расчет не включается. <i>При технической возможности допускается использование этой воды для подпитки декоративных водоемов с подачей по отдельно прокладываемому трубопроводу</i> 12.12. The surface water drainage system must take into account the possibility of receiving drainage water from associated drains , heating networks and common collectors of underground utilities. The flow of water into rain wells of insignificant volume from irrigation of paved areas and green spaces is not included in the calculation. <i>If technically possible, it is allowed to use this water to recharge decorative reservoirs with supply through a separately laid pipeline</i>
		12.17. Количество веществ и микроорганизмов, содержащихся в сбросах сточных, в том числе дренажных , вод в водные объекты, не должно превышать установленные нормативы допустимого воздействия на водные объекты 12.17. The amount of substances and microorganisms contained in wastewater discharges, including drainage waters, into water bodies should not exceed the established standards of permissible exposure to water bodies

для отвода или понижения уровня грунтовых вод, чтобы защитить возводимые сооружения от подтопления. Зачатки инновационного для РФ подхода использования дренажных вод для пополнения декоративных водоемов указаны в СП 42.13330.2016

«Градостроительство»⁵³. Продолжение этой научной линии отмечается в «Методических рекомендациях по организации водоотвода на улично-дорожной сети городов, не имеющих подземной (трубопроводной) ливневой канализации»⁵⁴. Так, Федераль-

⁵² СП 250.1325800.2016. Здания и сооружения. Защита от подземных вод. 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200138448>
⁵³ СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209>
⁵⁴ Методические рекомендации по организации водоотвода на улично-дорожной сети городов, не имеющих подземной (трубопроводной) ливневой канализации. М., 2019. URL: <https://elima.ru/docs/?id=10171>



Рис. 2. Начало строительства парка «Зарядье» в 2015 г.⁵⁵ и рендер победителя конкурса на проектирование парка «Зарядье»⁵⁶

Fig. 2. The beginning of construction of Zaryadye Park in 2015⁵⁵ and the competition winner's design render of Zaryadye Park⁵⁶

ный центр нормирования и стандартизации предлагает использовать биоинженерные сооружения, которые могут очистить нестабильный по составу и характеру ЗВ поверхностный сток там, где нет отвода в ливневки. А.Г. Мелехин и И.С. Щукин из Пермского национального исследовательского политехнического университета представляют расширенный список таких биоинженерных сооружений: фитофильтры, биопруды и биоплато [27]. Все биосооружения требуют использования видов растений, соответствующих климату по условиям морозостойкости и устойчивости к антропогенным факторам, например, воздействию противогололедных реагентов, дыма и газов в городской среде.

Концепция «ландшафтной инфраструктуры» в РФ

Новые определения для таких городских природных территорий в нормативных документах РФ появились в последние 10 лет. Это небольшой срок, относительно США и Европы, когда юридическое закрепление термина «зеленая инфраструктура» произошло в 80-х годах XX в. К настоящему моменту «зеленая инфраструктура» эволюционировала в понятие «ландшафтная инфраструктура». Этот термин собирает в себе понимание и «зеленой», и «голубой» инфраструктур, и рельефа без разделения на отдельные объекты в ткани города. «Ландшафтная инфраструктура» тесно связана с транспортной — в плане построения городских коммуникаций, пешеходной — в сфере рекреации, и самую большую связь должна иметь с инженерной инфраструктурой — по открытому дренажу, сбору и очистке ливневых вод.

В концепцию «ландшафтной инфраструктуры» сейчас вписывается «Зарядье», которое привычно

называется в путеводителе «парк», хотя имеет культурную, образовательную и природную ценность. Создателями было предложено принципиально новое осмысление территории — многоплановая среда, разнообразие ландшафтов и видовых точек и органичная интеграция в существующий городской контекст (рис. 2).

В основу системы заложен принцип «природного урбанизма», который позволил органично интегрировать парк в исторический центр Москвы, а павильоны — в зеленый мезорельеф, воссоздающий природу разных ландшафтных зон России (рис. 3).

Всего в парке «Зарядье» высажено 200 видов растений на 810 тыс. шт., из которых 760 деревьев, около 7 тыс. кустарников и более 800 тыс. многолетников⁵⁷. Большинство из них получает воду с помощью системы искусственного полива и орошения (рис. 4). К сожалению, биоремедиационный потенциал парка не используется, в том числе из-за отсутствия нормативной базы.

Еще один ландшафтный парк площадью около 3 га открыли в 2021 г. на площади Павелецкого вокзала, которая около двадцати лет находилась в запустении и даже успела создать собственную экосистему (рис. 5) — в недостроенном котловане собиралась дождевая вода, а по берегу этого «ревитализированного дождевого сада» прочно прижились семена растений, занесенные ветром, питаемая его водой⁵⁸.

Сейчас после благоустройства к вновь высаженным растениям подведена система искусственного полива, а дождевой сток со стеклянной крыши торгового центра, который мог бы быть к ним направлен, не устроен. В парке на Павелецкой площади используется принцип матричных посадок,

⁵⁵ Парку «Зарядье» — 3 года: летопись строительства, фото «до и после» и подарки москвичам. 2020. URL: https://stroim.mos.ru/photo_lines/s-dniem-rozhdeniia-park-zariad-ie-3-ghoda-spustia

⁵⁶ В парке «Зарядье» появится круговая панорама. 2016. URL: <https://www.mos.ru/news/item/15796073/>

⁵⁷ Ботаническая коллекция парка «Зарядье». 2023. URL: <https://www.zaryadypark.ru/botanical-collection/>

⁵⁸ Тайна павелецкой лужи: откуда взялся водоем у столичного вокзала // Московский комсомолец. 2018. URL: <https://www.mk.ru/moscow/2018/02/09/tayna-paveleckoy-luzhi-otkuda-vzyalsya-vodoem-u-stolichnogo-vokzala.html>



Рис. 3. Парк Зарядье, Москва. Июль, 2023 (фото авторов)
Fig. 3. Zaryadye Park, Moscow. July, 2023 (photo by the authors)



Рис. 4. Парк «Зарядье», Москва. Август, 2023 (фото авторов)
Fig. 4. Zaryadye Park, Moscow. August, 2023 (photo by the authors)



Рис. 5. Затопленный котлован на Павелецкой площади, Москва, 2018⁵⁹ и концептуальный рендер редизайна площади от инвестора⁶⁰

Fig. 5. A flooded pit on Paveletskaya Square, Moscow, 2018⁵⁹ and a conceptual rendering of the square’s redesign from an investor⁶⁰

⁵⁹ Котлован на Павелецкой площади — фото. 2018. URL: <https://stroiteh-msk.ru/foto/kotlovan-na-paveleckoj-ploschadi.html>
⁶⁰ Работы по реконструкции Павелецкой площади завершены на 90 %. 2021. URL: <https://stroimsk.ru/news/raboty-po-rekonstruktsii-pavelietskoi-ploschadi-zaversheny-na-90-bochkariov>



Рис. 6. «Павелецкая Плаза», Москва. Июль, 2023 (фото авторов)

Fig. 6. “Paveletskaya Plaza”, Moscow. July, 2023 (photo by the authors)

когда выбор растений продуман для гармоничного сочетания друг с другом, где полог декорируется древесной щепой с целью удержания влаги и борьбы с сорняками (рис. 6).

Такой тип имитирует под естественную модель растительного сообщества, например, полевую с последовательными слоями растительности, расположенными один над другим (рис. 7), с помощью которых растения образуют многомерные сообще-

ства, где всем хватает ресурсов, жизненного пространства и возможностей для размножения [17].

Таким образом, указанные парковые пространства олицетворяют собой попытки создания биотопов и биоплато в мегаполисе. Однако у каждого растения есть своя потребность в воде, отличающаяся от общепринятой в нормативах. В современных общественных пространствах проведен искусственный полив, который удовлетворяет потребности каждого вида растения. В то время как посадки



Рис. 7. Парк «Павелецкая Плаза», Москва. Август, 2023 (фото авторов)

Fig. 7. Paveletskaya Plaza Park, Moscow. August, 2023 (photo by the authors)

на улицах зачастую испытывают нехватку воды, даже при повышенной норме осадков, из-за нерегулярности их выпадения и расположения зеленых насаждений выше уровня тротуаров и дорог. В этом случае ливневые потоки вымывают почву на пешеходную и транспортную зоны, дополнительно ухудшая положение растений в городе. Одним из ярких примеров неудовлетворительного состояния зеленых насаждений является недавно благоустроенный Ленинский проспект в Москве, градостроительная ситуация которого была подробно рассмотрена в предыдущих статьях авторов [22, 28].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фиторемедиационный потенциал «зеленого» пространства в городе

Рассматриваемый перекресток находится на пересечении Ленинского пр-та и улиц Лобачевского и Обручева в Москве. По обе стороны Ленинского пр-та расположен лес, который до 2020 г. назывался природный комплекс «Юго-Западный лесопарк» и природный комплекс «Долина реки Самородинки». Лесопарк смотрится как единое целое, но был разделен на две части, так как находится на территории Юго-Западного и Западного административных округов г. Москвы, в районах Обручевский

и Тропарево-Никулино (граница районов проходит по Ленинскому пр-ту). В Генплане развития Москвы до 2035 года⁶¹ эта территория обозначается как особо охраняемая природная территория (ООПТ), предусмотренная к формированию в обоснованных границах. Постановлением Правительства Москвы от 20.07.2020 № 1001-ПП⁶² образована ООПТ «Ландшафтный заказник “Лес на реке Самородинке”»⁶³. По границам кадастровых участков на рис. 8 видно, что ООПТ и водоохранная зона реки вплотную прилегают не только к магистральной улице — Ленинскому пр-ту, но и к объектам потенциального негативного воздействия на окружающую среду: АЗС — 2 шт., снегоплавильный пункт — 2 шт.

Кадастровая неустроенность территории исследования проявляется и в наличии территорий без ка-

⁶¹ Генеральный план города Москвы до 2035 года. 2017. URL: https://genplanmos.ru/project/generalnyy_plan_moskvy_do_2035_goda/

⁶² Об образовании особо охраняемой природной территории регионального значения «Ландшафтный заказник “Лес на реке Самородинке”»: Постановление Правительства Москвы от 20.07.2020 № 1001-ПП. 2020. URL: <https://base.garant.ru/74481749/>

⁶³ Новые особо охраняемые природные территории Москвы. 2020. URL: <https://www.mos.ru/mayor/infographic/522291/>



Рис. 8. Схема ООПТ «Ландшафтный заказник “Лес на реке Самородинке”» (схема авторов)

Fig. 8. Scheme of the protected area “Landscape reserve «Forest on the Samorodinka River»” (authors’ scheme)

Табл. 3. Авторская классификация рукотворных биотопов

Table 3. The authors' classification of man-made biotopes

Тип биотопа посадки Type of biotope planting	Сухой 1 Dry biotope 1	Сухой 2 Dry biotope 2	Сухой 3 Dry biotope 3	Полувлажный Semi-wet biotope	Влажный Wet biotope
Значок Sign	≠	∄	⊂	⊆	∈
Тип биоинженерного сооружения Type of bioengineering structure	Биофльтрационный склон Biofiltration slope	Биодренажная канава Biodrenage ditch		Дождевой сад Rain garden	
Наличие инженерных сетей Presence of engineering networks	+			–	
Норма полива растений, л/м² The rate of watering plants, l/m²	2–7	7–14	14–25	25–50	<50

дастрового номера, и определенной функциональной принадлежности, что привело к использованию зеленых насаждений в качестве резервной территории для расширения улично-дорожной сети во время благоустройства 2020–2021 гг.

В кадастровом деле ООПТ «Ландшафтный заказник “Лес на реке Самородинке”», подготовленном Департаментом природопользования и охраны окружающей среды города Москвы⁶⁴, указывается, что охранный зона ООПТ не установлена, которая как раз необходима для предотвращения неблагоприятных антропогенных воздействий⁶⁵. Таким образом, из-за отсутствия охранной зоны на территории ООПТ «Ландшафтный заказник “Лес на реке Самородинке”» отмечается антропогенная нарушенность территории. До Ленинского пр-та р. Самородинка протекает в подземном коллекторе, ее долина на этом отрезке сохранилась только вдоль северной границы восточного участка Юго-Западного лесопарка. На поверхность р. Самородинка выходит ниже Ленинского пр-та и протекает в открытом русле. Вода в реке после таяния снега и ливневых дождей загрязнена, но в других условиях — визуально чистая. К сожалению, река почти не протекает, а существует в виде цепочки из четырех декоративных водоемов с бетонированными отвесными берегами.

Для изменения сложившейся ситуации следует использовать фиторемедиационный потенциал «зеленого» пространства в городе. Исследуемый перекресток имеет большой запас места для рас-

положения элементов зеленой инфраструктуры по всем сторонам [22]. Авторами было предложено создание дождевых садов для предотвращения затопления перекрестка во время сильных дождей из-за особенностей рельефа местности [28]. Искусственно созданные биолато с открытым зеркалом воды предназначены для очистки СВ. Вид растений выбирают в зависимости от природы загрязнений. Эффективность работы таких открытых биолато немного снижается в осенне-зимний период до 70 % [29], но качество очистки не ухудшается выше ПДК для выпуска очищенной воды в естественные водоемы [30]. Так, дождевой сад сумеет пополнить р. Самородинку чистой водой.

В табл. 3 авторами предлагается классификация и особенности инженерного устройства биотопов, созданных по аналогии с естественными природными сообществами и отличающихся по поливной норме в 1,5 раза.

Количество воды на создание условий оптимальной влажности для роста растений называется нормой полива. Норма полива на 1 м² площади зеленых насаждений зависит от дефицита запаса почвенной влаги и типа почвы [31–34]. При расчете этой нормы необходимо учитывать промачивание почвы на всю глубину распространения корневой системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей статье авторами предлагается ассортимент растений для эффективного функционирования дождевого сада. В табл. 4 представлены 27 наиболее характерных видов московской флоры из многолетних цветов и трав. Они распределены по возрастанию нормы полива, высоте и условиям освещенности для удобства планирования будущей ярусной посадки. Также в табл. 4 указаны месяцы цветения, чтобы во время вегетационного сезона одни цветущие растения сменяли другие. Большая часть предлагаемых растений относится к сухому биотопу 2 и 3, т.е. с водопотреблением от 7 до 25 л

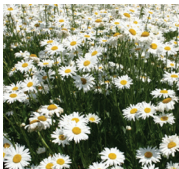
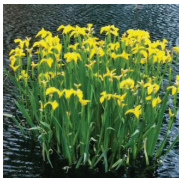
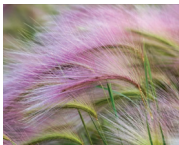
⁶⁴ Кадастровое дело № 019 «Особо охраняемая природная территория регионального значения ландшафтный заказник “Лес на реке Самородинке”». 2020. URL: <https://www.mos.ru/upload/content/files/019KDLZLesnarekeSamorodinke.docx>

⁶⁵ Об утверждении Правил создания охранных зон отдельных категорий особо охраняемых природных территорий, установления их границ, определения режима охраны и использования земельных участков и водных объектов в границах таких зон : Постановление Правительства Российской Федерации от 19.02.2015 № 138 (с изменениями на 04.10.2021). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420254912>

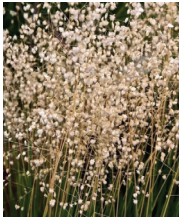
Табл. 4. Характеристика растений и природных условий для их выращивания
Table 4. Characteristics of plants and natural conditions for their cultivation

Название растения Name of plant	Месяц цветения Month of blooming						Количество на 1 м² (шт.) Quantity per 1 m² (pcs.)	Высо- та, см Height, cm	Свет Light	Норма воды на 1 м² Water norm per 1 m²		Тип био- топа Type of bio- tope	Фото Photo
	4	5	6	7	8	9				м³ / m³	литры litres		
Многолетники / Perennials													
Ландыш майский (под угрозой исчезновения) <i>Convallaria majalis</i> (endangered)	+	+					9–11	15–30	●	0,0035	3,5	☒	
Медуница (под угрозой исчезновения) <i>Pulmonária</i> (endangered)	+	+					6–8	<30	○ %	0,0042	4,2	☒	
Кислица обыкновенная (под угрозой исчезновения) <i>Ōxalis acetosélla</i> (endangered)	+	+					20–30	5–12	%	0,005	5	☒	
Ястребинка <i>Hieracium</i>		+	+	+	+	+	16	5–15	○	0,014	14	☒	
Мыльнянка <i>Saponária</i>			+	+	+		11	15–20	○	0,007	7	☒	
Скабиоза <i>Scabiósa</i>			+	+	+	+	6–11	<45	○	0,007	7	☒	
Вероника <i>Verónica</i>		+	+	+	+		9	25–130	○	0,0105	10,5	☒	
Примула весенняя (под угрозой исчезновения) <i>Primula véris</i> (endangered)	+	+					9–16	10–15	○ %	0,0238	23,8	☒	

Продолжение табл. 4 / Continuation of the Table 4

Название растения Name of plant	Месяц цветения Month of blooming						Количество на 1 м² (шт.) Quantity per 1 m² (pcs.)	Высо- та, см Height, cm	Свет Light	Норма воды на 1 м² Water norm per 1 m²		Тип био- топа Type of bio- tope	Фото Photo
	4	5	6	7	8	9				м³ / m³	литры litres		
Многолетники / Perennials													
Горечавка <i>Gentiāna</i>		+	+	+	+		6–8	10–30	○ %	0,0201	20,1	⊂	
Яснотка <i>Lámium</i>		+	+				11	<20	○ %	0,0182	18,2	⊂	
Лапчатка <i>Potentilla</i>		+	+	+	+	+	9–11	20–60	○ %	0,025	25	⊂	
Нивяник обыкновенный (под угрозой исчезновения) <i>Leucanthemum vulgare</i> (endangered)		+	+				6	80–90	%	0,028	28	⊆	
Ирис желтый (под угрозой исчезновения) <i>Íris pseudácorus</i> (endangered)			+				2–4	40–100	○ %	0,035	35	⊆	
Декоративные травы / Decorative herbs													
Бухарник мягкий <i>Holcus mollis</i>			+	+			4–5	20–30	○ %	0,0046	4,55	⊄	
Ячмень гривастый <i>Hordeum jubatum</i>			+	+			9–11	<50	○	0,0052	5,25	⊄	

Продолжение табл. 4 / Continuation of the Table 4

Название растения Name of plant	Месяц цветения Month of blooming						Количество на 1 м ² (шт.) Quantity per 1 m ² (pcs.)	Высо- та, см Height, cm	Свет Light	Норма воды на 1 м ² Water norm per 1 m ²		Тип био- топа Type of bio- tope	Фото Photo
	4	5	6	7	8	9				м ³ / m ³	литры litres		
Декоративные травы / Decorative herbs													
Овсяница <i>Festuca</i>			+				9	60–70	○	0,0048	4,8	☞	
Овсец вечнозеленый <i>Helictotrichon sempervirens</i>				+			4	<150	○ %	0,004	4	☞	
Чина весенняя (под угрозой исчезновения) <i>Lathyrus vernus</i> (endangered)	+	+					3–4	20–60	●	0,008	8,4	☞	
Трясунка средняя <i>Briza media</i>			+				6–8	<30	○ %●	0,0108	10,8	☞	
Дремлик широколистный (под угрозой исчезновения) <i>Epipactis helleborine</i> (endangered)			+	+			7–9	25–80	○ %	0,0108	10,8	☞	
Вейник остроцветковый <i>Calamagrostis acutiflora</i>				+			5–8	150–160	○ %	0,0105	10,5	☞	

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Название растения Name of plant	Месяц цветения Month of blooming						Количество на 1 м ² (шт.) Quantity per 1 m ² (pcs.)	Высо- та, см Height, cm	Свет Light	Норма воды на 1 м ² Water norm per 1 m ²		Тип био- топа Type of bio- tope	Фото Photo
	4	5	6	7	8	9				м ³ / m ³	литры litres		
Декоративные травы / Decorative herbs													
Молиния <i>Molinia</i>						+	4–6	40–90	○ %	0,0236	23,6	⊂	
Манник большой <i>Glyceria maxima</i>				+			4–6	40–50	○ %	0,0284	28	⊂	
Ожика лесная <i>Luzula sylvatica</i>	+	+					8–10	<60	%	0,029	29	⊂	
Камыш укореняющийся (под угрозой исчезновения) <i>Scirpus radicans</i> (endangered)				+			4	40–200	○ %	0,027	27	⊂	
Просо <i>Panicum</i>						+	4	120–240	○	0,0305	30	⊂	
Тростник южный <i>Phragmites australis</i>						+	1	200–250	○	0,0425	42,5	⊂	

на 1 м² и движением ливневой воды по благоустра-
иваемой территории. Это соответствует сложив-
шемуся рельефу территории с существующими
склонами и низиной в северо-западной части тер-
ритории исследования, куда проходят естественные

пути стока. В табл. 4 не представлены лиственные
и хвойные деревья и кустарники, так как территория
исследования включает часть ООПТ регионального
значения «Ландшафтный заказник “Лес на реке Са-
мородинке”», в котором преобладают березово-оси-

ново-еловые леса с участками дубрав и липо-дубняков. Луговая растительность ООПТ — это регулярно скашиваемые газоны и разнотравно-вейниковые луга. Газоны в составе зеленых насаждений представляют собой низкотравные сообщества с доминированием злаков с участием некоторых луговых растений и устойчивых к вытаптыванию видов. Разнотравно-вейниковая луговая растительность представлена залежами в южной части заказника, которые постепенно зарастают древесно-кустарниковой растительностью. Сообщества прибрежно-водных растений деградировали в результате ремонта пруда. В ООПТ сохранились небольшие группировки камыша укореняющегося, ириса желтого и манника большого по берегу пруда. При составлении табл. 4 были учтены месяц цветения растений и световые условия произрастания для наиболее естественной посадки в структуре биотопа.

В табл. 4 указан неполный и примерный перечень растений, которые могут быть использованы для посадки в городских биотопах. Создание биотопов по типу природных поможет предотвратить процесс вырождения растений, уже замеченный в городе из-за недостатка питательных элементов в почвенном слое грунта, а также из-за недостатка поверхностной дождевой воды. Для восстановления водных сообществ в р. Самородинка и пруду Запятая предлагаются растения полувлажного и влажного биотопов. Также в табл. 4 отмечены редкие виды и растения, находящиеся под угрозой исчезновения, которые нуждаются в постоянном контроле и наблюдении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внимание мирового сообщества на протяжении десятков лет приковано к климатическому кризису планеты и направлено на попытки снижения негативных последствий от глобального потепления. Основу решения проблемы глобального потепления составляют научные знания о климате и растениях. Среди них многочисленные конвенции и конференции, ежегодные доклады об изменении погоды в каждой стране и планеты в целом, сбор

и анализ климатических данных для прогнозирования развития погодных условий.

Прорывным результатом этих международных усилий стала теория, что повышенную температуру планеты возможно охладить за счет воды, испаряющейся с растений. Для использования фиторемедиационного потенциала «зеленого» пространства в городе необходимо увеличить численность растений всех типов и направить к ним ливневые воды в качестве дополнительного питания. Осуществление этих действий предполагает и изменение нормативных документов для создания, переустройства и регулирования биоинженерной инфраструктуры в городской черте.

В статье авторами сделана попытка предложения научного подхода к решению обозначенной глобальной экологической проблемы. Резервная территория в кадастровом контуре Ленинского пр-та предлагается в качестве площадки апробации с ассортиментом растений для различных биотопов, чтобы аккумулировать, впитывать и проводить ливневую воду через растения. Нормативные документы РФ в этой области не затрагивают поверхностную воду и ее отвод, особенно в контексте золотоизвлекательных фабрик. Это большая проблема, так как все развитые страны вне зависимости от климата (например, холодный, как в Финляндии, или тропический, как в Австралии) достигли экологической стабильности с сохранением озелененных территорий, и уже начали работать на другом градостроительном уровне — инженерной подготовке территории, создавая зелено-технологичную инфраструктуру через использование поверхностной воды и фиторемедиационных способностей растений в части осаждения твердых частиц, фильтрации химических загрязнений и т.д.

Внедрение зеленой, голубой или ландшафтной инфраструктур в городской среде не только выполнит климатические задачи, но и оздоровит существующий природный ресурс, повысит узнаваемость городской среды и добавит в постоянное пользование новые социокультурные сценарии для городских жителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fowler H.J., Lenderink G., Prein A.F., Westra S., Allan R.P., Ban N. et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021. Vol. 2. Issue 2. Pp. 107–122. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6
2. Michael Le Page. Earth passes 2 °C of warming on hottest day ever recorded // *New Scientist*. 2023. URL: <https://www.newscientist.com/article/2403743-earth-passes-2c-of-warming-on-hottest-day-ever-recorded/>

3. Nkonya E., Mirzabaev A., Braun J. Economics of Land Degradation and Improvement — a Global Assessment for Sustainable Development. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-19168-3
4. Laufkötter C., Zscheischler J., Frölicher T.L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming // *Science*. 2020. Vol. 369. Issue 651. Pp. 1621–1625. DOI: 10.1126/science.aba-0690

5. Park C.E., Jeong S.J., Joshi M., Osborn T.J., Ho C.H., Piao S. et al. Keeping global warming within 1.5 °C constrains emergence of aridification // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. Issue 1. Pp. 70–74. DOI: 10.1038/s41558-017-0034-4
6. Bytnerowicz T.A., Akana P.R., Griffin K.L., Menge D.N.L. Temperature sensitivity of woody nitrogen fixation across species and growing temperatures // *Nature Plants*. 2022. Vol. 8. Issue 3. Pp. 209–216. DOI: 10.1038/s41477-021-01090-x
7. Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю. и др. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // *Лесоведение*. 2021. № 5. С. 531–546. DOI: 10.31857/S0024114821050077. EDN OWSSBF.
8. Гетманова Ю.П. Китайская «Кремниевая долина» — технопарк Чжунгуаньцунь // *Азиатско-Тихоокеанский регион: история и современность — XIV : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 100-летию дипломатических отношений России и Монголии*. 2021. С. 55–58. EDN DBCCPE.
9. Межов С.И., Бастаубаев А.К. Инновационное развитие в Китае // *Экономическое развитие региона: управление, инновации, подготовка кадров*. 2018. № 5. С. 230–236. EDN YARKVF.
10. Вальдхайм Ч. Ландшафт как урбанизм // *Архитекторы РФ*. 2022. URL: <https://xn--80akijuiemcz7e.xn--plai/articles/landshaft-kak-urbanizm>
11. *Tharp R. Ecological Stormwater Management: Analysis of design components to improve understanding and performance of stormwater retention ponds : Dissertations*. Burlington, University of Vermont, 2018. 157 p.
12. *Ferry R., Monoian E. Land art as climate action*. Munich : Hirmer Publishers, 2023. 240 p.
13. Kurutz S. From Europe, a No-Chlorine Backyard Pool // *The New York Times*. 2007.
14. Kim Harrisberg. How can ‘sponge cities’ use nature to tackle climate-fuelled floods? // *Thomson Reuters Foundation*. 2022. URL: <https://news.trust.org/item/20220327192248-8ntoq/>
15. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. Issue 4. P. 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82
16. Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С., Степаненко В.М., Чернокульский А.В., Давлетшин С.Г. и др. Влияние Московского мегаполиса на осадки теплого периода в зависимости от крупномасштабных атмосферных условий // *Водные ресурсы*. 2023. Т. 50. № 5. С. 550–560. DOI: 10.31857/S0321059623600151. EDN HOVOYL.
17. Li F., Xiao J., Chen J., Ballantyne A., Jin K., Li B. et al. Global water use efficiency saturation due to increased vapor pressure deficit // *Science*. 2023. Vol. 381. Issue 6658. Pp. 672–677. DOI: 10.1126/science.adf5041
18. Dunn R.J.H., Alexander L.V., Donat M.G., Zhang X., Bador M., Herold N. et al. Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. Vol. 125. Issue 16. DOI: 10.1029/2019JD032263
19. Alberti M., Palkovacs E.P., Roches S.D., Meester L.D., Brans K.I., Govaert L. et al. The complexity of urban eco-evolutionary dynamics // *BioScience*. 2020. Vol. 70. Issue 9. Pp. 772–793. DOI: 10.1093/biosci/biaa079
20. Menzel A., Fabian P. Growing season extended in Europe // *Nature*. 1999. Vol. 397. Issue 6721. P. 659. DOI: 10.1038/17709
21. Zohner C.M., Mirzagholi L., Renner S.S., Mo L., Rebindaine D., Bucher R. et al. Effect of climate warming on the timing of autumn leaf senescence reverses after the summer solstice // *Science*. 2023. Vol. 381. Issue 6653. DOI: 10.1126/science.adf5098
22. Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 11. С. 1429–1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452
23. Абдықадыров А., Марксылы С., Таштай Е., Куттыбаева А. Исследование процесса очистки и обеззараживания поверхностных вод с помощью озонаторной установки // *Вестник КазАТК*. 2023. № 126 (3). С. 462–478. DOI: 10.52167/1609-1817-2023-126-3-462-478. EDN QDRCQQ.
24. Dunbabin J.S., Bowner K.H. Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals // *Science of the Total Environment*. 1992. Vol. 111. Issue 2–3. Pp. 151–168. DOI: 10.1016/0048-9697(92)90353-t
25. Hemalatha M., Mohan S.V. Duckweed biorefinery — Potential to remediate dairy wastewater in integration with microbial protein production // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 346. P. 126499. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126499
26. Dinh T.T.U., Soda S., Nguyen T.A.H., Nakajima J., Cao T.H. Nutrient removal by duckweed from anaerobically treated swine wastewater in lab-scale stabilization ponds in Vietnam // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 722. P. 137854. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137854
27. Мелехин А.Г., Щукин И.С. Анализ существующих биоинженерных сооружений очистки поверхностного стока и возможности их применения в условиях Западного Урала // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2013. № 2. С. 40–51. EDNRBQSGB.
28. Feofanova S.S., Zaykova E.Y. Territorial physical and mathematical model of stormwater management //

E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 403. P. 04003. DOI: 10.1051/e3sconf/202340304003

29. Talabi A.O., Kayode T.J. Groundwater Pollution and Remediation // Journal of Water Resource and Protection. 2019. Vol. 11. Issue 01. Pp. 1–19. DOI: 10.4236/jwarp.2019.111001

30. Ульрих Д.В. Биоинженерные сооружения для очистки загрязненных поверхностных стоков // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 148. EDN ZEOOMF.

31. Калмыкова А.Л. Строительство и содержание объектов ландшафтной архитектуры : краткий курс лекций. Саратов : Саратовский ГАУ, 2016. 37 с.

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

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

34. Zaykova E. Strategies ensuring the Stability of Natural and Urbanized Biotopes in hybrid multifunctional objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012065

Поступила в редакцию 4 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 10 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Юрьевна Зайкова — кандидат архитектуры, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3019-6269, РИНЦ ID: 503400, ORCID: 0000-0002-0555-9941; lena_landscape21@mail.ru;

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

Вклад авторов:

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fowler H.J., Lenderink G., Prein A.F., Westra S., Allan R.P., Ban N. et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021; 2(2):107-122. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6

2. Michael Le Page. Earth passes 2 °C of warming on hottest day ever recorded. *New Scientist*. 2023. URL: <https://www.newscientist.com/article/2403743-earth-passes-2c-of-warming-on-hottest-day-ever-recorded/>

3. Nkonya E., Mirzabaev A., Braun J. *Economics of Land Degradation and Improvement – a Global Assessment for Sustainable Development*. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-19168-3

4. Laufkötter C., Zscheischler J., Frölicher T.L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science*. 2020; 369(651):1621-1625. DOI: 10.1126/science.aba0690

5. Park C.E., Jeong S.J., Joshi M., Osborn T.J., Ho C.H., Piao S. et al. Keeping global warming within 1.5 °C constrains emergence of aridification. *Nature Climate Change*. 2018; 8(1):70-74. DOI: 10.1038/s41558-017-0034-4

6. Bytnerowicz T.A., Akana P.R., Griffin K.L., Menge D.N.L. Temperature sensitivity of woody nitrogen fixation across species and growing temperatures. *Nature Plants*. 2022; 8(3):209-216. DOI: 10.1038/s41477-021-01090-x

7. Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Yu., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Yu. et al. A role of forests in natural systems adaptation to climate change. *Russian Journal of Forest Science*. 2021; 5:531-546. DOI: 10.31857/S002411-4821050077. EDN OWSSBF. (rus.).

8. Getmanova Yu. China's silicon valley — Zhongguancun technopark. *Asia-Pacific region: history and modernity – XIV : Materials of the international scientific and practical conference of young scientists dedicated to the 100th anniversary of diplomatic relations between Russia and Mongolia*. 2021; 55-58. EDN DBCCPE. (rus.).

9. Mezhov S.I., Bastubaev A.K. Innovation development in China. *Economic Development of the Region: Management, Innovation, Training*. 2018; 5:230-236. EDN YARKVF. (rus.).

10. Val'dkhaym Ch. Landscape as urbanism. *Architects of the Russian Federation*. 2022. URL: <https://xn--80akijuiemcz7e.xn--p1ai/articles/landshaft-kak-urbanizm> (rus.).
11. Tharp R. *Ecological Stormwater Management: Analysis of design components to improve understanding and performance of stormwater retention ponds : Dissertations*. Burlington, University of Vermont, 2018; 157.
12. Ferry R., Monoian E. *Land art as climate action*. Munich, Hirmer Publishers, 2023; 240.
13. Kurutz S. From Europe, a No-Chlorine Backyard Pool. *The New York Times*. 2007.
14. Kim Harrisberg. How can 'sponge cities' use nature to tackle climate-fuelled floods? *Thomson Reuters Foundation*. 2022. URL: <https://news.trust.org/item/20220327192248-8ntoq/>
15. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. *Environmental Research Letters*. 2019; 14(4):045001. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82
16. Yarinich Yu.I., Varentsov M.I., Platonov V.S., Stepanenko V.M., Chernokulsky A.V., Davletshin S.G. et al. The effect of Moscow megapolis on warm-season precipitation depending on large-scale atmospheric conditions. *Water Resources*. 2023; 50(5):550-560. DOI: 10.31857/S0321059623600151. EDN HOVOYL. (rus.).
17. Li F., Xiao J., Chen J., Ballantyne A., Jin K., Li B. et al. Global water use efficiency saturation due to increased vapor pressure deficit. *Science*. 2023; 381(6658):672-677. DOI: 10.1126/science.adf5041
18. Dunn R.J.H., Alexander L.V., Donat M.G., Zhang X., Bador M., Herold N. et al. Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020; 125(16). DOI: 10.1029/2019JD032263
19. Alberti M., Palkovacs E.P., Roches S.D., Meester L.D., Brans K.I., Govaert L. et al. The Complexity of Urban Eco-evolutionary Dynamics. *BioScience*. 2020; 70(9):772-793. DOI: 10.1093/biosci/biaa079
20. Menzel A., Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*. 1999; 397(6721):659. DOI: 10.1038/17709
21. Zohner C.M., Mirzagholi L., Renner S.S., Mo L., Rebindaine D., Bucher R. et al. Effect of climate warming on the timing of autumn leaf senescence reverses after the summer solstice. *Science*. 2023; 381(6653). DOI: 10.1126/science.adf5098
22. Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Green infrastructure as a stormwater management tool. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(11):1429-1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452 (rus.).
23. Abdikadyrov A., Marxuly S., Tashtai E., Kuttybayeva A. Investigation of the process of purification and disinfection of surface waters using an ozonator plant. *Vestnik KazATK*. 2023; 126(3):462-478. DOI: 10.52167/1609-1817-2023-126-3-462-478. EDN QDRCQQ. (rus.).
24. Dunbabin J.S., Bowner K.H. Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals. *Science of the Total Environment*. 1992; 111(2-3):151-168. DOI: 10.1016/0048-9697(92)90353-t
25. Hemalatha M., Mohan S.V. Duckweed bio-refinery – Potential to remediate dairy wastewater in integration with microbial protein production. *Biore-source Technology*. 2022; 346:126499. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126499
26. Dinh T.T.U., Soda S., Nguyen T.A.H., Nakajima J., Cao T.H. Nutrient removal by duckweed from anaerobically treated swine wastewater in lab-scale stabilization ponds in Vietnam. *Science of the Total Environment*. 2020; 722:137854. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137854
27. Melekhin A.G., Shchukin I.S. Analysis of existing bioengineered surface runoff treatment facilities and the possibility of their application in the conditions of the Western Urals. Bulletin of Perm State Technical University. *Construction and Architecture*. 2013; 2:40-51. EDNRBQSG. (rus.).
28. Feofanova S.S., Zaykova E.Y. Territorial physical and mathematical model of stormwater management. *E3S Web of Conferences*. 2023; 403:04003. DOI: 10.1051/e3sconf/202340304003
29. Talabi A.O., Kayode T.J. Groundwater Pollution and Remediation. *Journal of Water Resource and Protection*. 2019; 11(01):1-19. DOI: 10.4236/jwarp.2019.111001
30. Ulrikh D.V. Bioengineering facilities for contaminated surface runoff treatment. *Engineering journal of Don*. 2017; 2(45):148. EDN ZEOOMF. (rus.).
31. Kalmykova A.L. *Construction and maintenance of landscape architecture objects : a short course of lectures for students of the training direction*. Saratov, Saratov State Agrarian University, 2016; 37. (rus.).
32. Zaykova E. Healing landscapes in the multi-functional hybrid objects. *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. 2019; 347-355.
33. Zaykova E. Formation methods of hybrid urban spaces in the historic city center. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701031
34. Zaykova E. Strategies ensuring the Stability of Natural and Urbanized Biotopes in hybrid multi-functional objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012065. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012065

Received December 4, 2023.

Adopted in revised form on December 8, 2023.

Approved for publication on January 10, 2024.

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

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

Contribution of the authors:

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

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.042.41

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.713-728

Прогнозирование аэродинамических коэффициентов на закручивающиеся формообразующие зданий и сооружений на базе машинного обучения и CFD-моделирования

Сергей Гургенович Саиян, Вероника Борисовна Шелепина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведены исследования по применению машинного обучения с целью прогнозирования аэродинамических коэффициентов на закручивающиеся формообразующие зданий и сооружений. Для обучения использовались данные аэродинамических продувок на базе численного моделирования в ANSYS CFX. Оценивалось качество прогнозов различных моделей машинного обучения по сравнению с численным моделированием. Сделаны выводы, относящиеся к использованию моделей машинного обучения для определения ветровых нагрузок на здания и сооружения.

Материалы и методы. Для анализа полученных результатов и разработки модели машинного обучения применялись язык программирования Python и библиотеки: Pandas, NumPy, Scikit-learn и Matplotlib. Рассматривались четыре метода машинного обучения: линейная регрессия, решающее дерево, метод k -ближайших соседей, случайный лес. Для формирования обучающих данных использовались аэродинамические продувки на основе методов численного моделирования в ANSYS CFX. Точность различных моделей машинного обучения в прогнозировании аэродинамических коэффициентов оценивалась на основе статистической меры соответствия R -квадрат.

Результаты. Составлена база из 217 численных решений для различных углов закручивания формообразующей здания. Эти результаты включают распределение аэродинамических коэффициентов давления по поверхности здания, а также аэродинамические коэффициенты сил и моментов (C_x , C_y , C_{Mz}) в зависимости от высоты. Данные использовались для обучения четырех моделей машинного обучения. Для лучшей модели машинного обучения (случайный лес) проведена верификация модели в сравнении с результатами численного моделирования.

Выводы. Исследованы различные модели машинного обучения для прогнозирования аэродинамических коэффициентов на здания и сооружения. Сделаны выводы о применимости методов машинного обучения в качестве альтернативного подхода к определению ветровых нагрузок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: машинное обучение, численное моделирование, CFD-моделирование, здания и сооружения с закручивающейся формообразующей, аэродинамические характеристики, аэродинамические коэффициенты, ветровая нагрузка на здания и сооружения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саиян С.Г., Шелепина В.Б. Прогнозирование аэродинамических коэффициентов на закручивающиеся формообразующие зданий и сооружений на базе машинного обучения и CFD-моделирования // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 713–728. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.713-728

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

Prediction of aerodynamic coefficients for twisting shapes of buildings and structures based on machine learning and CFD-modelling

Sergey G. Saiyan, Veronika B. Shelepina

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

ABSTRACT

Introduction. Research was carried out on the application of machine learning to predict aerodynamic coefficients on buildings and structures with twisted form configurations. Data from aerodynamic simulations using numerical modelling

in ANSYS CFX was used for training. The quality of predictions made by various machine learning models was evaluated in comparison to numerical simulations. Conclusions related to the use of machine learning models for determining wind loads on buildings and structures are drawn.

Materials and methods. Python programming language and the following libraries, Pandas, NumPy, Scikit-learn, and Matplotlib were used to analyze the obtained results and to develop the machine learning model. The study considered four machine learning methods: linear regression, decision tree, k -nearest neighbours, and random forest. Aerodynamic simulations based on numerical modelling methods in ANSYS CFX were used to generate the training data. The accuracy of different machine learning models in predicting aerodynamic coefficients was evaluated using the statistical measure of R -squared.

Results. As a result of the research, a database of 217 numerical solutions was compiled for various angles of twist of the building's form. These results include the distribution of aerodynamic pressure coefficients over the building's surface, as well as aerodynamic force and moment coefficients (C_x , C_y , C_{Mz}) as a function of height. The data was used to train four machine learning models. The best-performing machine learning model (random forest) was verified by comparing it to the results of numerical modelling.

Conclusions. Various machine learning models for predicting aerodynamic coefficients on buildings and structures were investigated. Conclusions were drawn regarding the applicability of machine learning methods as an alternative approach to determining wind loads.

KEYWORDS: machine learning, numerical modelling, CFD modelling, buildings and structures with twisting shaping, aerodynamic characteristics, aerodynamic coefficients, wind loads on buildings and structures

FOR CITATION: Saiyan S.G., Shelepina V.B. Prediction of aerodynamic coefficients for twisting shapes of buildings and structures based on machine learning and CFD-modelling. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):713-728. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.713-728 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамические характеристики зданий и сооружений играют важную роль в проектировании и эксплуатации, так как они оказывают значительное влияние на несущие и фасадные конструкции, а также на динамическую комфортность верхних этажей. В связи с этим становятся актуальными исследования, направленные на аэродинамическую оптимизацию форм высотных зданий с целью минимизации ветрового воздействия, что позволит рационализировать расходы на строительство. Оптимизация аэродинамической формы для высотных зданий связана с выбором оптимальной формообразующей, которая достигается несколькими способами: выбор аэродинамической формы, геометрическое изменение углов зданий, конические формы, а также геометрические изменения в поперечном сечении формообразующей [1]. Одним из распространенных вариантов подобной оптимизации является использование закручивающейся формообразующей высотного здания, которая снижает ветровое воздействие. Наиболее известные высотные здания с закручивающейся формообразующей: Shanghai Tower (Шанхай, Китай), Сауан Tower (Дубай, ОАЭ), Башня Эволюции (Москва, Россия), The F&F Tower (Панама Сити, Панама), Al Tijaria Tower (Кувейт), United Tower (Манама, Бахрейн), Turning Torso (Мальмё, Швеция) и др. На рис. 1 показаны фотографии высотных зданий с закручивающейся формообразующей.

Существующие способы определения ветровых нагрузок и воздействий на здания и сооружения делятся на четыре основных подхода: инженерные нормативно-аналитические методики¹ [2], испыта-

ния в аэродинамических трубах [3, 4], численное моделирование [5–10], мониторинг и реальные замеры [11, 12]. Вследствие сложных аэродинамических форм высотных зданий и сооружений необходимы современные и более продвинутые методы исследования ветровых воздействий. На настоящий момент наиболее современным методом исследования аэродинамических характеристик зданий и сооружений является численное моделирование задач гидрогазодинамики (вычислительная гидрогазодинамика), позволяющее исследовать различные формообразующие уникальных зданий и сооружений. Однако обработка полученных данных может быть трудоемкой и затратной для последующих многовариантных расчетов, поиска оптимальной формы, а также исследования аэродинамических характеристик зданий и сооружений. Применение методов на основе машинного обучения даст возможность использовать данные об аэродинамических продувках для создания прогнозных математических моделей определения аэродинамических характеристик зданий и сооружений при ветровом воздействии, что значительно упростит процесс аэродинамического анализа и выбор оптимальных вариантов формообразующих.

Машинное обучение имеет широкий спектр приложений в различных отраслях науки и техники: распознавание речи, жестов; техническая и медицинская диагностика; прогнозирование временных рядов; категоризация документов; проектирование изделий и др. Методы машинного обучения могут применяться во многих областях строительства [13]: в сфере проектирования зданий и сооружений [14, 15], планировании и управлении строительными проектами [16], безопасности на строительной площадке [17], мониторинге строительных конструкций [18] и прочих направлениях.

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (с Изменениями № 1, 2, 3). М. : Минрегион России, 2021.



Рис. 1. Высотные здания с закручивающейся формообразующей: *a* — Башня Эволюции (Москва, Россия); *b* — Cayan Tower (Дубай, ОАЭ); *c* — United Tower (Манама, Бахрейн)

Fig. 1. High-rise buildings with a twisting formative structure: *a* — Evolution Tower (Moscow, Russia); *b* — Cayan Tower (Dubai, UAE); *c* — United Tower (Manama, Bahrain)

Для задач аэродинамики рассматриваемый метод может использоваться с целью оптимизации аэродинамической формы благодаря результатам аэродинамических исследований [19–24].

Машинное обучение обычно предоставляет системам возможность учиться и совершенствоваться на основе накопленного опыта автоматически. Для интеллектуального анализа данных и последующей автоматизации ключевым моментом служит изучение алгоритмов. Алгоритмы машинного обучения можно разделить на четыре основных типа [25]:

- обучение с учителем: как правило, является задачей по изучению функции, которая сопоставляет входные данные с выходными на основе выборочных сведений. Обучение с учителем используется, когда определены цели, которые должны быть достигнуты на основе набора входных данных. Наиболее распространенные задачи обучения с учителем — задачи классификации (дискретный выходной параметр) и регрессии (непрерывный выходной параметр);
- обучение без учителя: анализирует неразмеченные данные без вмешательства экспериментатора. Наиболее распространенные задачи обучения без учителя — задачи кластеризации, уменьшения размерности, обнаружения аномалий и т.д.;
- обучение с частичным привлечением учителя: можно определить как гибрид вышеупомянутых методов, поскольку работает как с размеченными данными, так и с неразмеченными. К задачам обучения с частичным привлечением учителя относятся задачи классификации и кластеризации;

- обучение с подкреплением: позволяет испытуемой системе оценивать оптимальное поведение в определенном контексте или среде для повышения ее эффективности. Этот тип обучения основан на вознаграждении или наказании, и его конечная цель состоит в том, чтобы использовать информацию, полученную из контекста, для принятия мер по увеличению вознаграждения или минимизации риска.

Методы машинного обучения могут быть применены для обработки и анализа больших объемов данных, полученных в результате численного моделирования задач CFD (Computational Fluid Dynamics), с целью предсказания аэродинамических коэффициентов на закручивающихся формообразующих зданий и сооружений при ветровом воздействии.

В статье представлено описание методологии, алгоритмов применения, а также тестирование различных моделей машинного обучения для прогнозирования аэродинамических коэффициентов на закручивающиеся формообразующие изолированных зданий и сооружений при ветровом воздействии на базе численных продувок по результатам CFD-моделирования в программном комплексе (ПК) ANSYS CFX. Рассмотрены различные модели машинного обучения с целью определения оптимальных подходов, позволяющих наиболее достоверно прогнозировать аэродинамические коэффициенты на закручивающихся формообразующих изолированных зданий и сооружений. На рис. 2 показана блок-схема методики-алгоритма, используемого в настоящей статье для CFD-моделирования, фор-

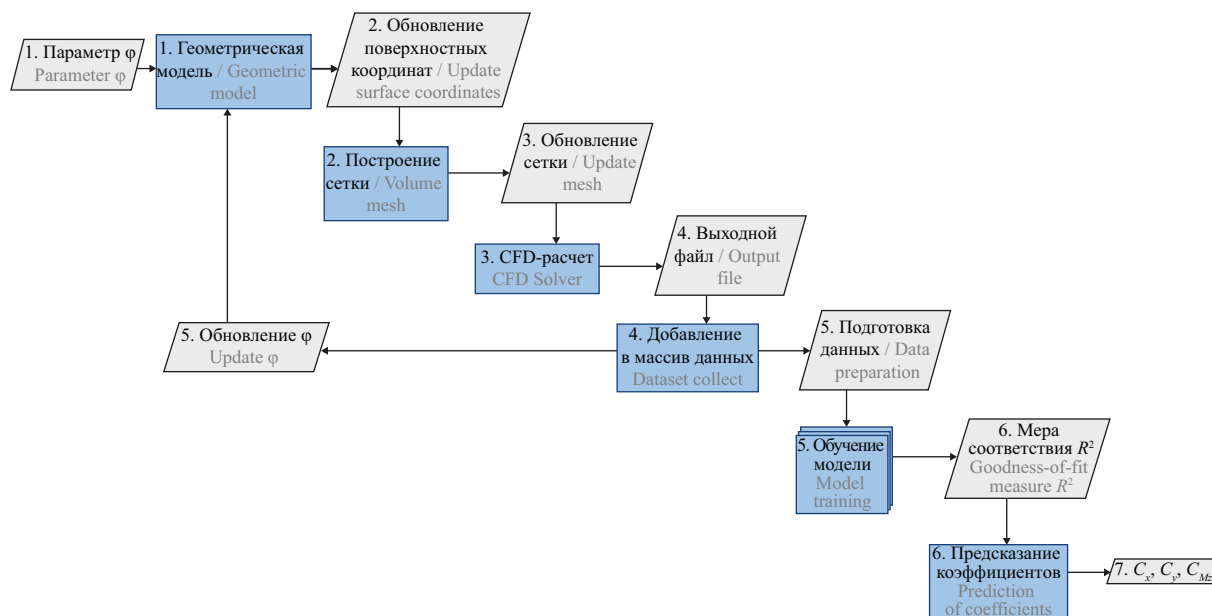


Рис. 2. Алгоритм параметрического CFD-моделирования, формирования базы данных и обучения моделей машинного обучения

Fig. 2. Algorithm of parametric CFD-simulation, database formation and machine learning model training

мирования базы данных и обучения моделей машинного обучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается высотное здание размерами $40 \times 40 \times 200$ м, для которого в качестве входных параметров варьировался угол поворота формообразующей φ в диапазоне $[0^\circ; 540^\circ]$ с шагом расчета $2,5^\circ$. В виде выходных данных машинного обучения используются аэродинамические коэффициенты сил и моментов (C_x , C_y , C_{Me}) на 20 различных уровнях высоты в диапазоне $[0; 200]$ м с шагом 10 м. На рис. 3 приведены геометрические модели для закручивающейся формообразующей здания при $\varphi = 25^\circ$ и $\varphi = 156^\circ$.

С целью создания прогнозной математической модели машинного обучения необходимы результаты аэродинамических исследований, которые будут использоваться в качестве обучающих данных. Для их формирования проводились численные аэродинамические исследования высотных изолированных зданий при ветровом воздействии, для которых параметрически изменялись углы закручивания формообразующих вокруг своей оси (рис. 3).

Для аэродинамических исследований необходимо разработать расчетную конечно-объемную модель воздушного пространства вокруг здания. Расчетная область выбрана прямоугольной формы для более устойчивого сочетания используемых граничных условий «течение в канале». Размеры расчетной области составили 2040×3440 м с высотой 1200 м и выбраны в соответствии с рекоменда-

ми². Подобные размеры необходимы для минимизации влияния выбора граничных условий на структуру течения вблизи исследуемого здания вследствие задания искусственных граничных условий атмосферы, используемых в CFD-моделировании.

В областях, где ожидается высокий градиент скоростей ветра и давлений, создается качественная мелкая сетка, в других областях — более грубая. Параметры используемых для расчетов конечно-объемных сеток представлены в таблице. На рис. 4 показан разрез конечно-объемной сетки, а также поверхностная конечно-объемная сетка на здании.

Расчетной области присвоен домен Air (Воздух) со следующими физическими параметрами: тип среды — несжимаемый воздух при температуре (25°C) и давление 1 атм (рис. 5). Граничные условия на «входе» в расчетную область (*Inlet*) заданы в виде средней скорости потока $\overline{U}(z)$ и по форме соответствуют нормативному профилю СП 20.13330.2016¹ согласно ветровому району 1 и типу местности В. Зависимости средней скорости на входе $\overline{U}(z)$ и кинетической энергии турбулентности (*TKE*) от высоты над землей представлены на рис. 5. Масштаб турбулентности принят равным 300 м в соответствии с рекомендациями Eurocode³. На «выходе» из расчетной области (*Outlet*) и на верхней границе области потока назначаются «мягкие» граничные

² Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R. et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008. No. 96. Pp. 1749–1761. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.058

³ Eurocode 1: Actions on structures — Part 1–4: General actions — Wind action. CEN, 2010.

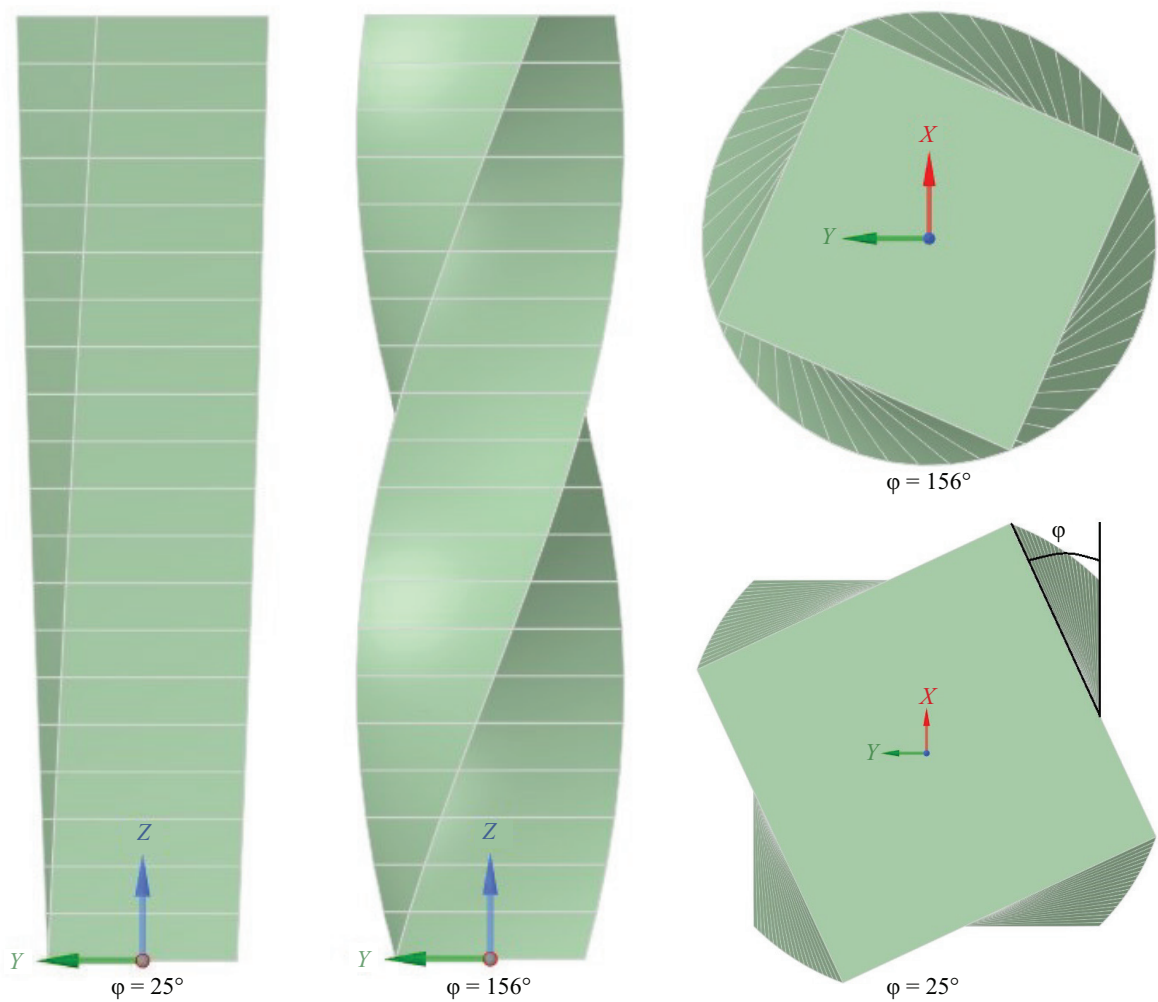


Рис. 3. Геометрия закручивающейся формообразующей здания при $\varphi = 25^\circ$ и $\varphi = 156^\circ$ (вид сбоку и сверху)
Fig. 3. Geometry of the twisting formative structure of the building at $\varphi = 25^\circ$ and $\varphi = 156^\circ$ (side view and top view)

Параметры конечно-объемной сетки
Parameters of the finite-volume mesh

Местоположение Location	Размер элементов у поверхностей, м Size of elements at surfaces, m	Размер элементов в объеме, м Size of elements in volume, m
В прямоугольном объеме размерами 80 × 80 м и высотой 260 м In a rectangular volume measuring 80 × 80 m and 260 m high	3,0	3,0
В прямоугольном объеме размерами 640 × 1000 м и высотой 600 м In a rectangular volume measuring 640 × 1,000 m and 600 m high	8,0	12,0
В прямоугольном объеме размерами 2040 × 3440 м и высотой 1200 м In a rectangular volume measuring 2,040 × 3,440 m and 1,200 m high	25,0	50,0
На поверхности здания On the surface of the building	0,75	—

условия *Opening* с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе». На «земле» и на здании задано граничное условие «стенки с прилипанием» (No-Slip

Wall, $U = V = W = 0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

Расчеты ветровых потоков и воздействий на здания и сооружения сводятся в общем случае к чис-

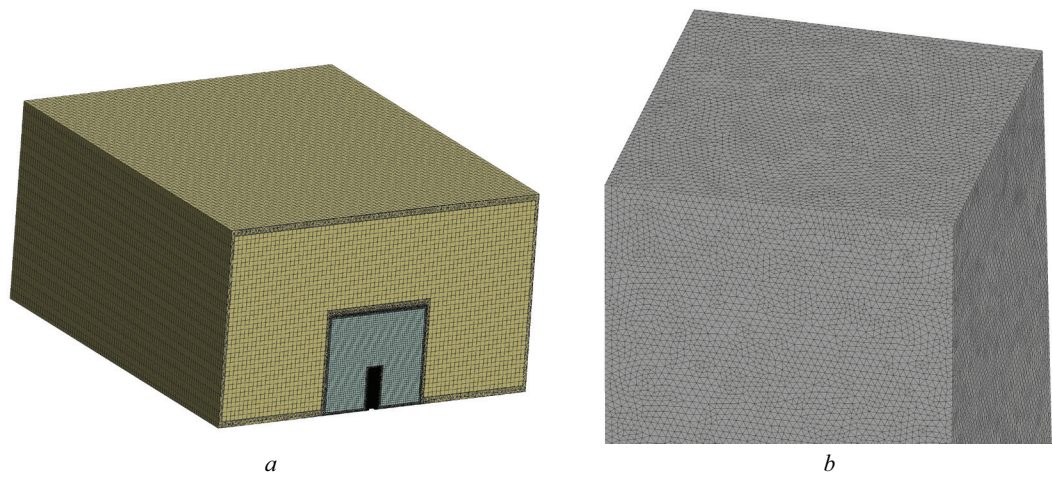


Рис. 4. Сечение конечно-объемной сетки (a) и поверхностная конечно-объемная сетка на здании (b)
Fig. 4. Finite-volume mesh section (a) and surface finite-volume mesh on the building (b)

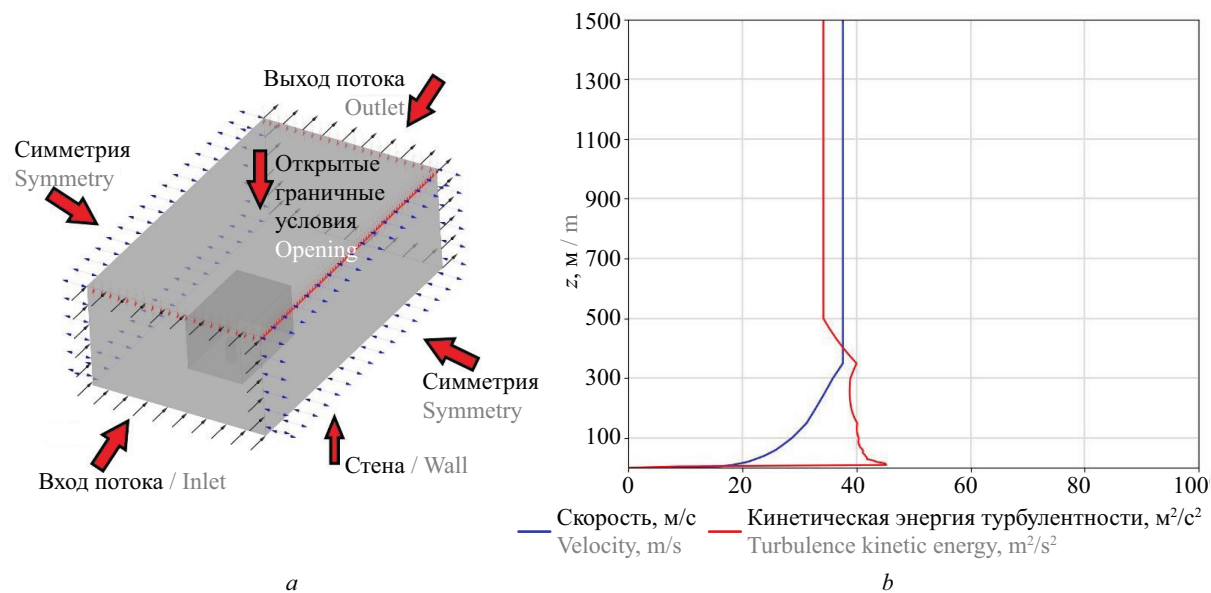


Рис. 5. Расчетная область с указанием граничных условий (a) и ветровой профиль на Inlet (b)
Fig. 5. Calculation area with indication of boundary conditions (a) and the wind profile on the Inlet (b)

ленному решению системы трехмерных нестационарных нелинейных уравнений Навье – Стокса. В практических задачах определения ветровых нагрузок и воздействия на здания и сооружения с практически обоснованным упрощением ветровые потоки принимаются несжимаемыми ($p = \text{const}$) и изотермическими ($T = \text{const}$), а внешние массовые силы не учитываются. Тогда нестационарные и нелинейные уравнения гидрогазодинамики примут следующий вид⁴:

- уравнения движения (Навье – Стокса):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]; \\ &\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]; \\ &\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

- уравнения неразрывности и состояния:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

⁴ Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецово; под ред. Б.Е. Маслова. М. : Стройиздат, 1984. 360 с.

$$p = \text{const}, \quad (3)$$

где u, v, w — искомые компоненты вектора скорости (по осям x, y, z); t — время; μ — динамический коэффициент вязкости для воздуха; p — давление.

Прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation — DNS) (1)–(3) с учетом вихрей всех масштабов при современных возможностях ЭВМ практически реализуемо только для очень малых скоростей потока и чисто исследовательских задач с использованием суперкомпьютеров.

Для практических целей в настоящей статье применяется подход к моделированию турбулентности, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие ($u_i(t) = \bar{u}_i + u_i'(t)$), так называемые осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (Reynolds Averaged Navier – Stokes — RANS). По совокупности своих качеств одной из оптимальных RANS-моделей турбулентности является модель Ментера (Menter Shear Stress Transport Turbulence Model, сокращенно — SST-модель)^{5, 6}. SST-модель представляет собой комбинацию k - ϵ и k - ω моделей турбулентности, обеспечивающую сочетание лучших качеств этих моделей. Модель k - ϵ хорошо справляется с расчетом струйных и сдвиговых течений, а модель k - ω обеспечивает более точное описание пристеночных пограничных слоев. В модели SST комбинируются k - ϵ и k - ω с помощью сконструированной для этого эмпирической функции (функции

переключателей), которая обеспечивает близость суммарной модели к модели k - ϵ вдали от твердых стенок и к модели k - ω в пристеночной части потока (вблизи здания).

Для анализа полученных результатов и разработки модели машинного обучения был написан программный код, для которого использовался язык программирования Python и библиотеки:

- Pandas — хранение и обработка данных;
- NumPy — численные расчеты и обработка информации;
- Scikit-learn — методы машинного обучения;
- Matplotlib — визуализация информации.

В ходе исследования рассматривались четыре метода машинного обучения: линейная регрессия, решающее дерево, метод k -ближайших соседей, случайный лес. Представленные методы являются популярными методами машинного обучения с учителем, используя алгоритмы линейной (линейная регрессия) и нелинейной (решающее дерево, метод k -ближайших соседей, случайный лес) регрессии⁷.

Линейная регрессия⁸. Это модель зависимости одной переменной y от другой переменной x с линейной функцией зависимости:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i, \quad (4)$$

где y_i — зависимая переменная; β_0, β_1 — параметры модели; x_i — независимая переменная.

Для оценки параметров линейной регрессии применяется метод наименьших квадратов, который находит числовые значения из условий минимизации суммы квадратов отклонений y_i по вертикали от линии регрессии:

$$D = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2. \quad (5)$$

На рис. 6 показана блок-схема алгоритма линейной регрессии.

⁷ 10 Popular Regression Algorithms in Machine Learning of 2022 // UNext.

⁸ Linear Regression // MLU-Explain. URL: <https://mlu-explain.github.io/linear-regression/>

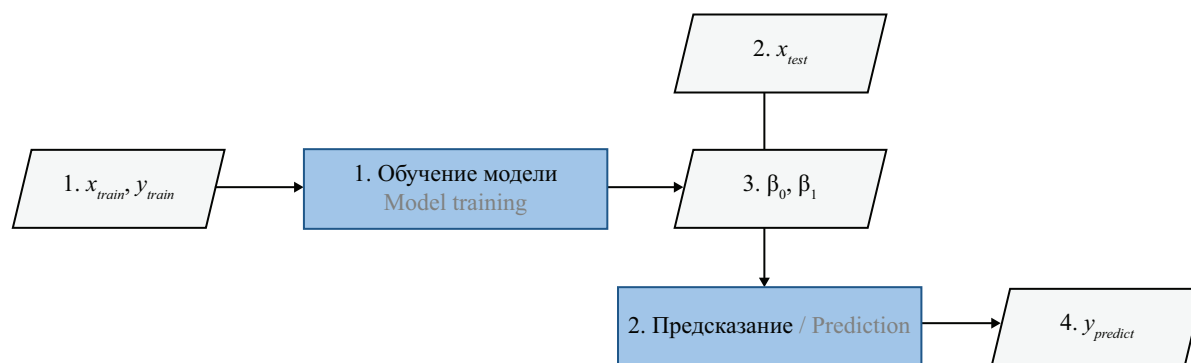


Рис. 6. Алгоритм линейной регрессии⁸

Fig. 6. Linear regression algorithm⁸

Решающее дерево⁹. Решающее дерево (дерево решений) — это непараметрический метод обучения с учителем, работающий как для задач классификации, так и для задач регрессии. На каждой итерации для входного подмножества обучающего множества строится такое разбиение пространства гиперплоскостью, которое минимизировало бы среднюю меру неоднородности двух полученных подмножеств. Данная процедура выполняется рекурсивно для каждого полученного подмножества до тех пор, пока не будут достигнуты критерии останова. Для задач регрессии мерой неоднородности является среднеквадратическая ошибка (*MSE*):

$$MSE = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(y_i - \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l y_i \right)^2, \tag{6}$$

где *l* — число объектов в подмножестве; *y_i* — значение целевого признака.

В настоящем исследовании глубина решающего дерева не ограничивалась.

На рис. 7 показана блок-схема алгоритма решающего дерева.

Метод *k*-ближайших соседей¹⁰. Регрессия *k*-ближайших соседей — это непараметрический метод, который интуитивно аппроксимирует связь между независимыми переменными и непрерывным результатом, усредняя наблюдения в одной и той же

окрестности. Для каждой тестируемой точки необходимо найти такую окрестность, чтобы в ней поместились *k* точек с известными значениями *y*. Тогда прогноз для тестируемой точки можно получить, усредняя значение отклика всех обучающих наблюдений из окрестности:

$$f(x) = \frac{1}{k} \sum_{x_i \in N_k(x)} y_i, \tag{7}$$

где *N_k(x)* — множество ближайших к *x* объектов. В настоящем исследовании количество соседей было принято равным 5.

На рис. 8 представлена блок-схема алгоритма метода *k*-ближайших соседей.

Случайный лес¹¹. Данный метод является расширением к регрессии решающего дерева. Каждое решающее дерево имеет высокую дисперсию, однако при их параллельном объединении результирующая дисперсия невелика, поскольку результат зависит не от одного дерева, а от нескольких. В задачах регрессии конечным результатом случайного леса служит среднее значение всех выходных деревьев решений.

В настоящем исследовании глубина решающих деревьев не ограничивалась, количество деревьев было увеличено до 300 (*n_estimators* = 300). На рис. 9 показана блок-схема алгоритма случайного леса.

⁹ Regression Trees // Medium.

¹⁰ K-nearest Neighbours Regression // Bookdown. URL: https://bookdown.org/tpinto_home/Regression-and-Classification/k-nearest-neighbours-regression.html

¹¹ Random Forest Regression in Python // GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/random-forest-regression-in-python/>

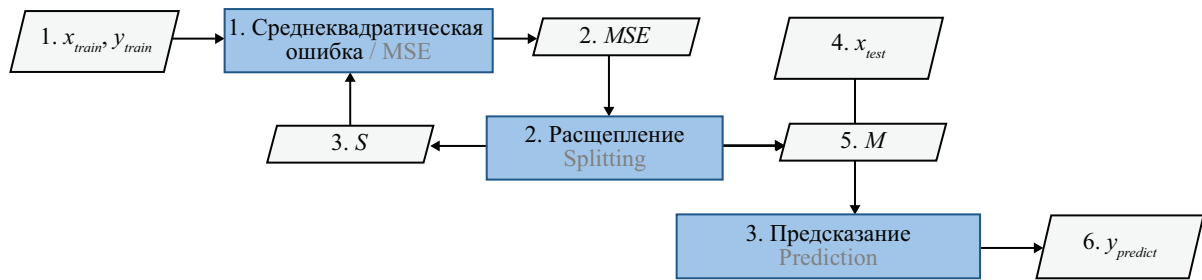


Рис. 7. Алгоритм решающего дерева: *S* — подмножество; *M* — модель⁹

Fig. 7. Decision tree algorithm: *S* — subset; *M* — model⁹

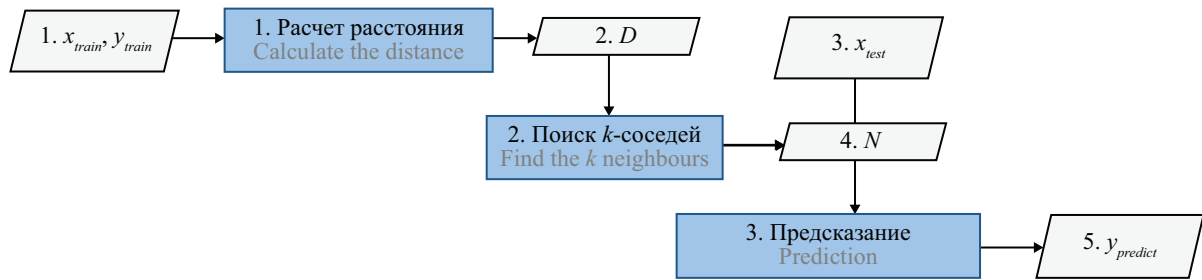


Рис. 8. Алгоритм метода *k*-ближайших соседей: *D* — расстояние между данными; *N* — область, содержащая *k* соседей¹⁰

Fig. 8. K-Nearest Neighbours method algorithm: *D* is the distance between the data; *N* is the area containing *k* neighbours¹⁰

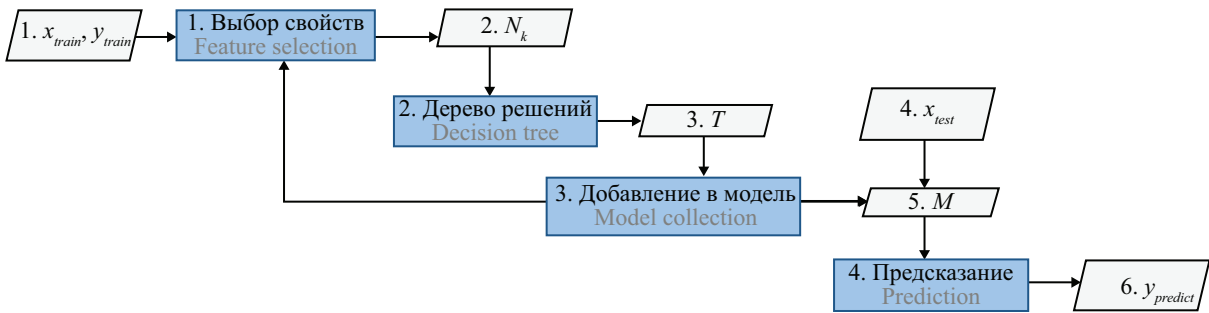


Рис. 9. Алгоритм случайного леса: N_k — случайный выбор k параметров; T — дерево решений; M — модель¹¹

Fig. 9. Random forest algorithm: N_k is a random selection of k parameters; T is a decision tree; M is a model¹¹

Показатель точности. Для оценки точности использовалась статистическая мера соответствия R -квадрат:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

(8)

где y_i — реальные значения y в каждом наблюдении; $\hat{y}_i$ — значения, предсказанные моделью; $\bar{y}$ — среднее по всем реальным значениям y_i .

В данном исследовании для каждой целевой переменной, представляющей собой аэродинамические коэффициенты сил и моментов (C_x , C_y , C_{M_z}) на 20 различных уровнях высоты, была построена отдельная регрессионная модель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе результатов, полученных в ходе вычислений, составлена база данных из 217 вариантов

расчетов при различных углах закручивания формообразующей здания ф. Изополя аэродинамических коэффициентов давления на зданиях с разным углом закручивания представлены на рис. 10.

Приведем результаты параметрического исследования изменения аэродинамических коэффициентов сил и моментов (C_x , C_y , C_{M_z}) для всех компонент по высоте в зависимости от параметра угла закручивания формообразующей здания ф на различных уровнях высоты (рис. 11).

С помощью библиотеки Scikit-learn база данных была разделена на тренировочную и тестовую выборки, где тренировочная выборка составила 75 % от всей базы сведений, тестовая — 25 %. В функции train_test_split использовался параметр первоначальной перестановки данных random_state = 42. Перестановка данных необходима для изучения признаков каждого значения целевой переменной и обеспечивает

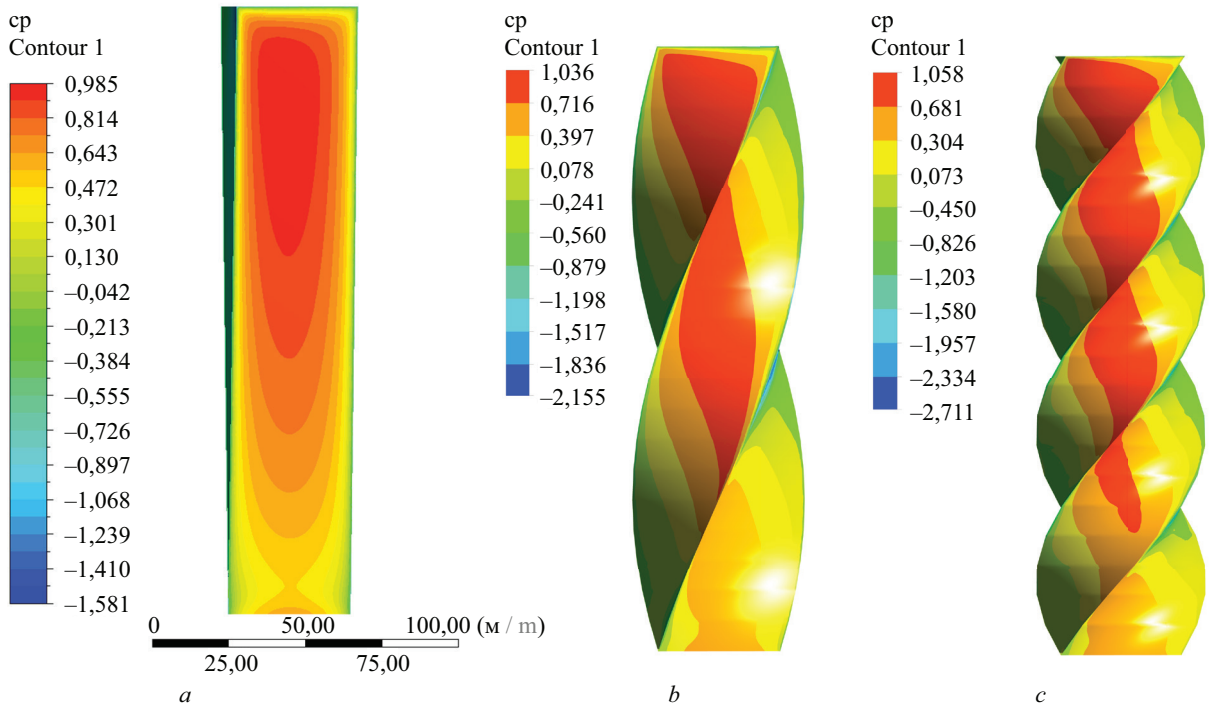


Рис. 10. Изополя аэродинамических коэффициентов для зданий с углом закручивания: a — $\varphi = 10^\circ$; b — $\varphi = 180^\circ$; c — $\varphi = 360^\circ$

Fig. 10. Isofields of aerodynamic coefficients for buildings with a twist angle: a — $\varphi = 10^\circ$; b — $\varphi = 180^\circ$; c — $\varphi = 360^\circ$

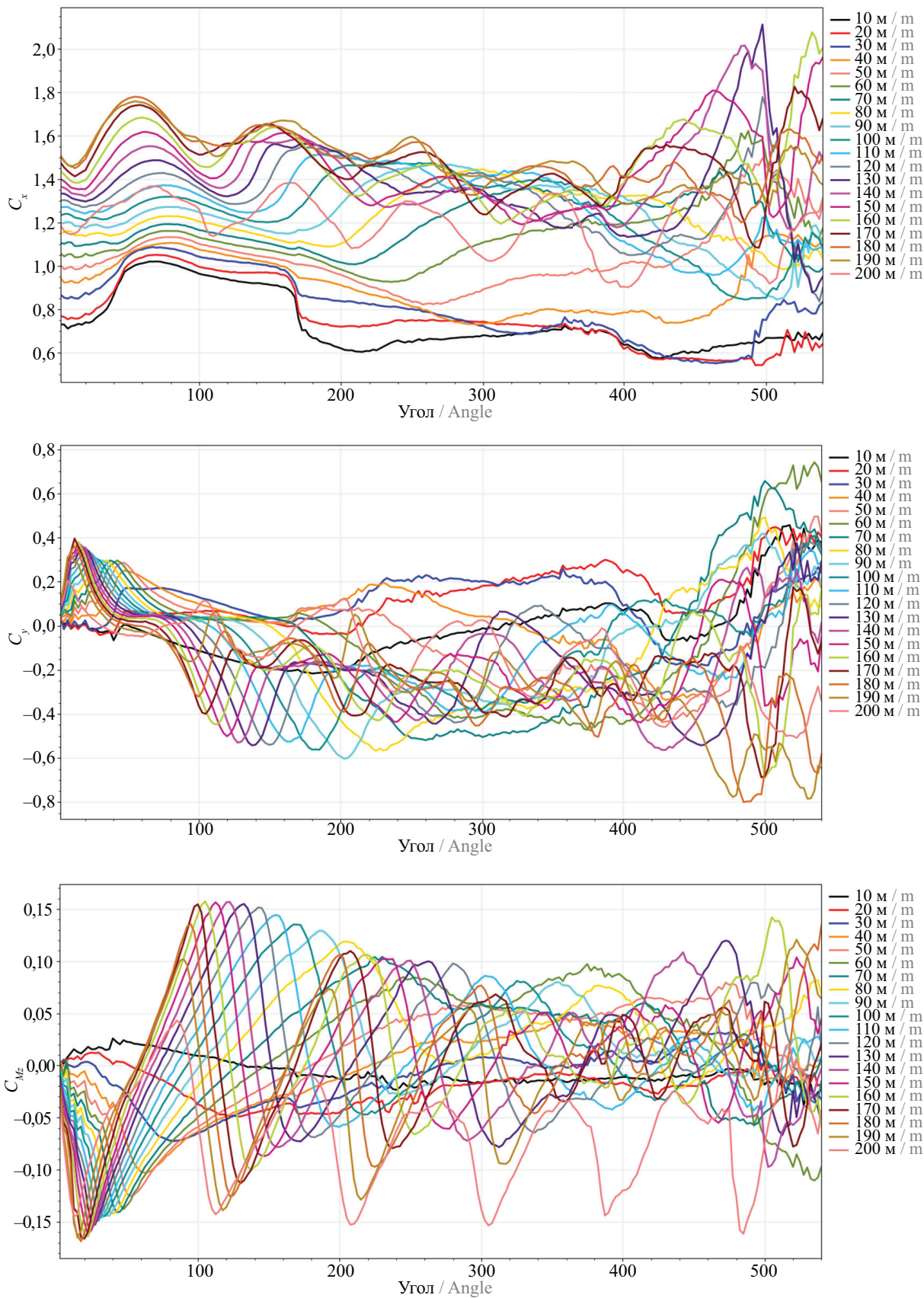


Рис. 11. Графики зависимостей аэродинамических коэффициентов сил и моментов (C_x , C_y , C_{Me}) для всех компонент по высоте в зависимости от параметра угла закручивания формообразующей здания φ

Fig. 11. Graphs of the dependences in aerodynamic coefficients of forces and moments (C_x , C_y , C_{Me}) for all components in height, depending on the parameter of the twist angle of the building shape φ

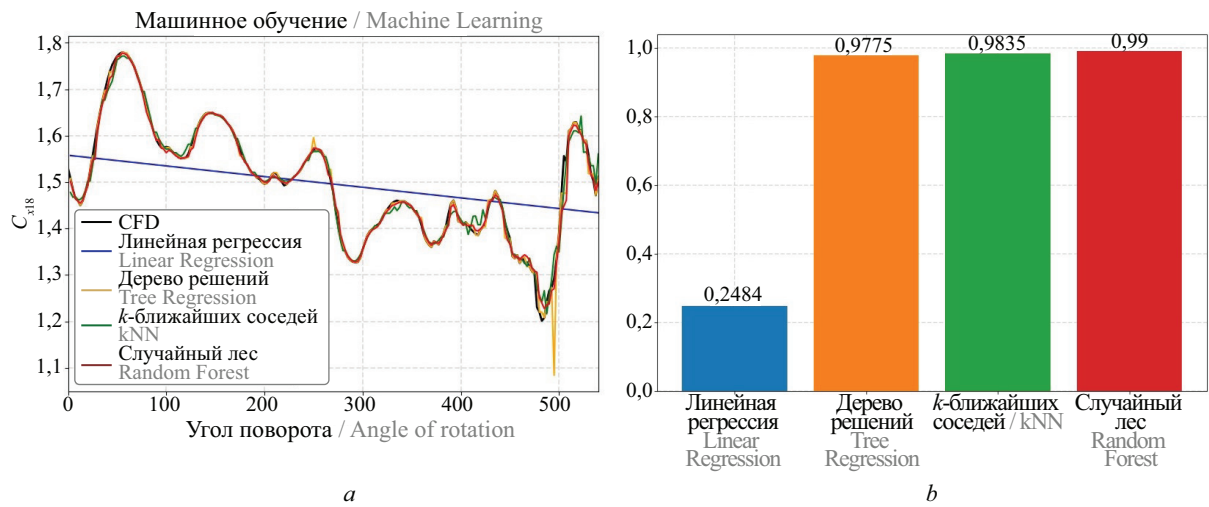


Рис. 12. Графики изменения аэродинамического коэффициента C_x на высоте 170–180 м и предсказания моделей машинного обучения (а); гистограмма коэффициентов детерминации для разных моделей машинного обучения (b)

Fig. 12. Graphs of changes in aerodynamic coefficient C_x at an altitude of 170–180 m and predictions of machine learning models (a); histogram of determination coefficients for different machine learning models (b)

разнообразие данных для обучения модели машинного обучения. При «отключении» первоначальной перестановки данных (shuffle = False) в тренировочную выборку попадают результаты расчетов для высоты здания от 0 до 160 м, а предсказание производится для высоты здания от 160 до 200, из-за чего модель окажется непригодной для тестовой выборки и проверки точности обучения. Для визуализации результатов машинного обучения и сравнения предсказанных значений с реальными была выбрана 18 компонента здания, находящаяся на высоте 170–180 м (рис. 12, а). С целью установления точности вычислений определен коэффициент детерминации R-квадрат для каж-

дой компоненты здания и найдено среднее значение (рис. 12, b).

Оценив точность обученных моделей, можно сделать вывод, что линейная регрессия не подходит для определения аэродинамических коэффициентов. Наибольшую точность показал метод случайный лес, однако такой результат обусловлен и большими временными затратами на обучение (4,63235 с) по сравнению с деревом решений (0,01561 с) и методом k-ближайших соседей (0,015621 с), что является важным показателем для больших задач, где время вычислений значительно.

Для верификации модели случайный лес вычислим аэродинамические коэффициенты для про-

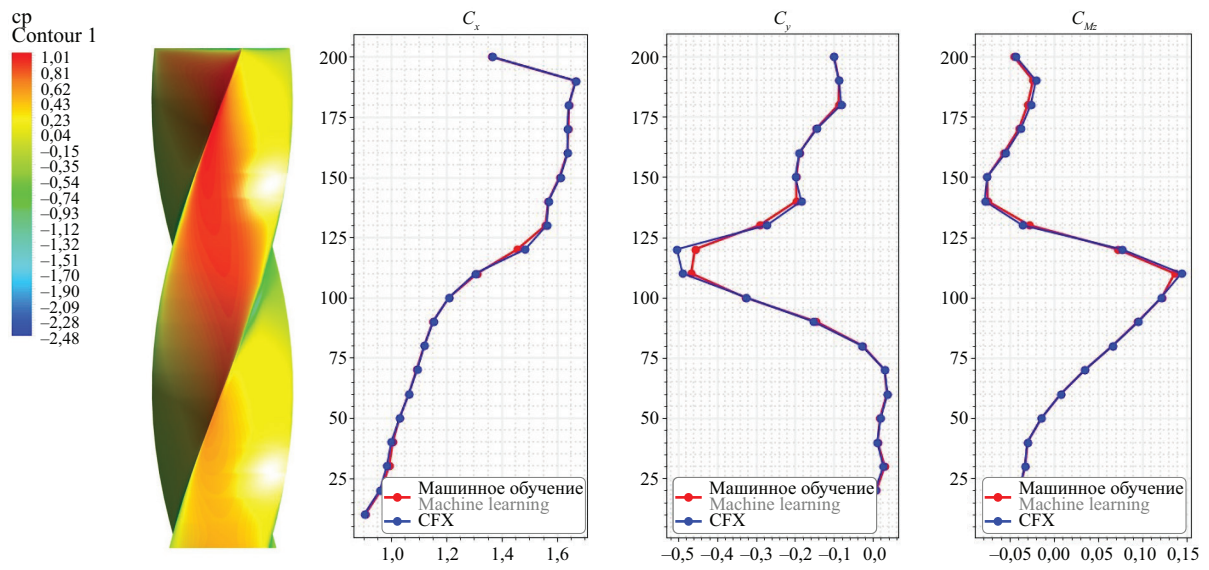


Рис. 13. Графики изменения аэродинамических коэффициентов сил и моментов (C_x , C_y , C_{Me}) по всей высоте здания

Fig. 13. Graphs of changes in aerodynamic coefficients of forces and moments (C_x , C_y , C_{Me}) over the entire height of the building

межуточного варианта закручивания здания с углом закручивания $\varphi = 156^\circ$ (соответствующий углу закручивания башни «Эволюция») как обученной моделью машинного обучения, так и используя ПК ANSYS CFX, и сравним полученные результаты (рис. 13).

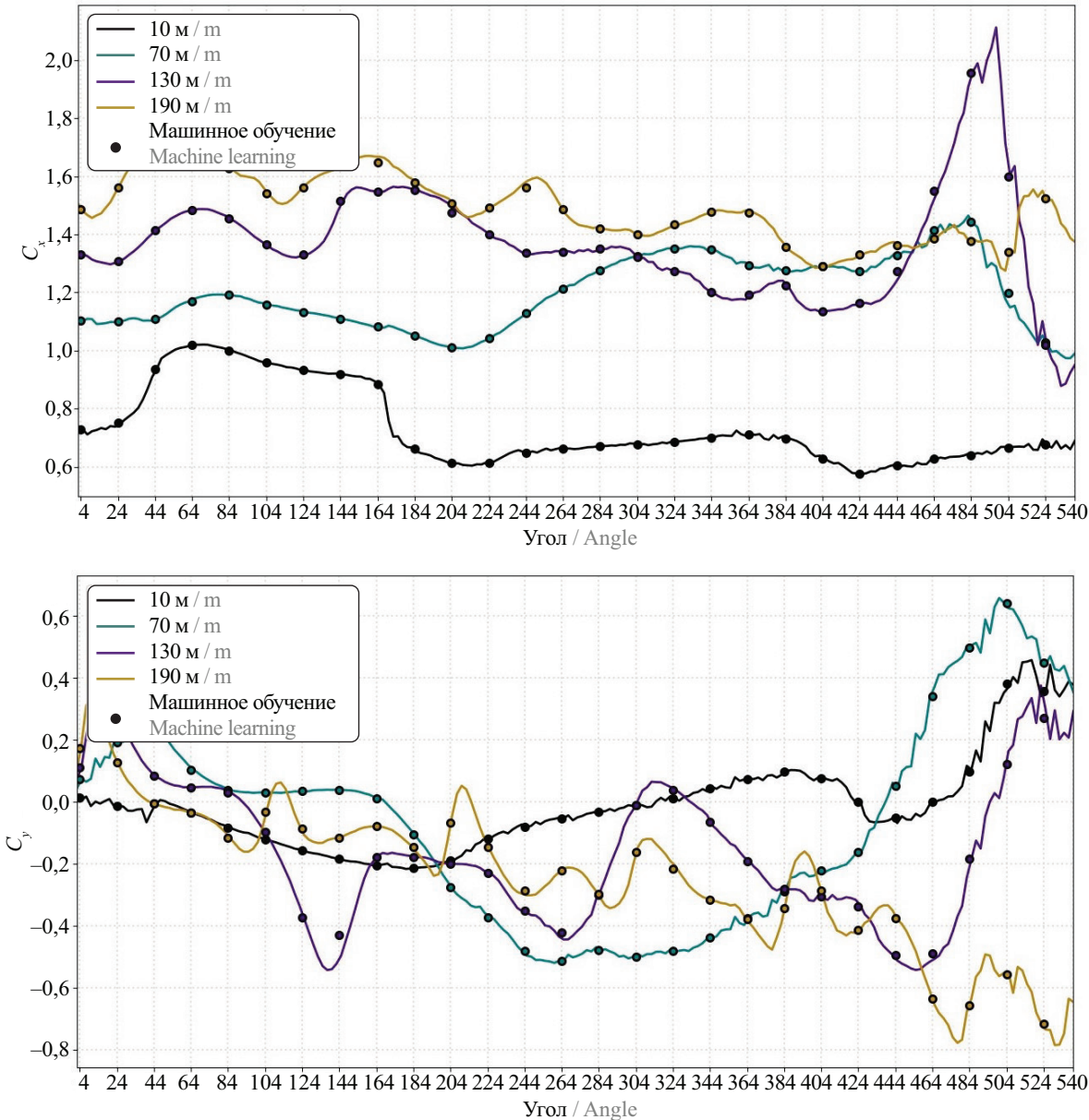
Из результатов сопоставительного анализа видна хорошая корреляция вычислений аэродинамических коэффициентов на основе расчетов CFD-моделирования и прогноза моделей машинного обучения. Приведем более полный сопоставительный анализ для различных компонент по высоте здания в зависимости от угла закручивания формообразующей φ (рис. 14, 15). Для оценки точности полученной модели машинного обучения были рассчитаны аэродинамические коэффициенты для промежуточных значений угла закручивания формообразующей φ в диапазоне от 4 до 540° с шагом расчета 20° .

Как видно из результатов, погрешности вычислений у модели машинного обучения составляют не более 5 %. Основным преимуществом такого подхода служит время расчета по сравнению с численным моделированием в ПК ANSYS CFX.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных исследований по прогнозированию аэродинамических коэффициентов на закручивающиеся формообразующие зданий и сооружений с использованием моделей машинного обучения можно сделать следующие выводы.

Проведены аэродинамические исследования зданий и сооружений с закручивающейся формообразующей в ПК ANSYS CFX, на основе которых создана база данных результатов из 217 вариантов для обучения модели машинного обучения. Применение CFD-моделирования позволило получить детальную



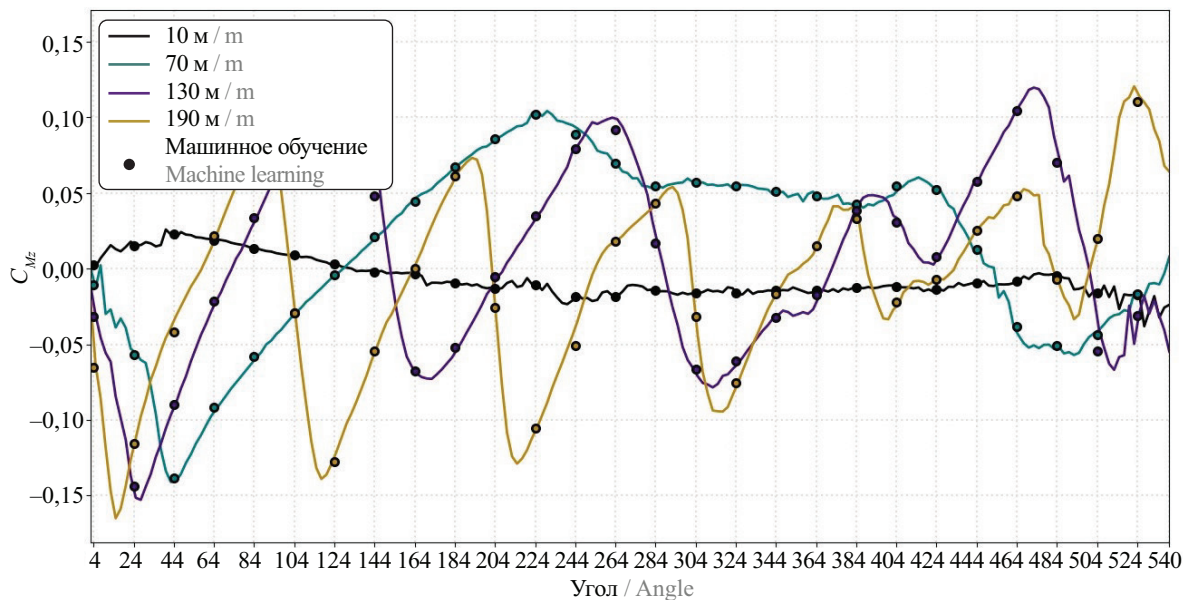


Рис. 14. Сопоставление результатов расчета аэродинамических коэффициентов сил и моментов (C_x , C_y , C_{Me}) от параметра угла закручивания формообразующей здания φ по результатам CFD-моделирования (сплошные линии) и машинного обучения по модели случайный лес (точки)

Fig. 14. Comparison of the results of calculation of aerodynamic coefficients of forces and moments (C_x , C_y , C_{Me}) from the parameter of the twist angle of the building shape φ based on the results of CFD modelling (solid lines) and machine learning based on the random forest model (dots)

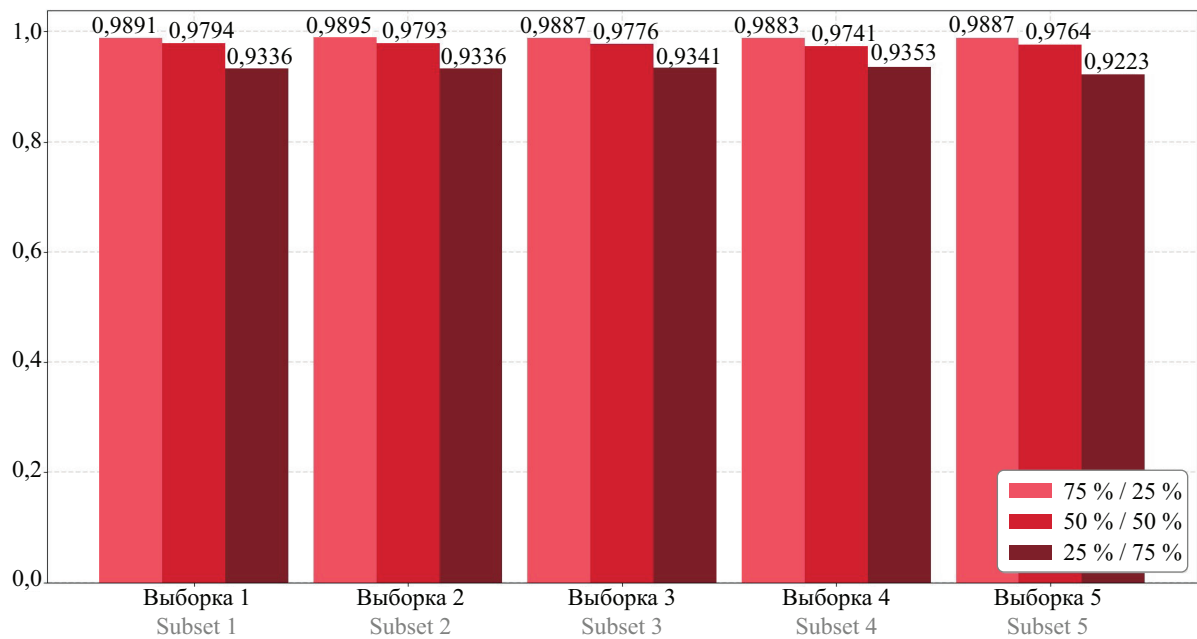


Рис. 15. Сравнение коэффициентов детерминации для различных выборок с различным соотношением тестовой и тренировочной выборок для метода случайный лес

Fig. 15. Comparison of determination coefficients for different specimens with different ratio of test and training specimens for the random forest method

информацию об аэродинамических характеристиках зданий и сооружений и использовать эти данные для обучения моделей машинного обучения.

Протестированы различные модели машинного обучения для прогноза аэродинамических коэффициентов для зданий и сооружений с закручивающейся формообразующей. В результате исследования было показано, что машинное обучение может быть эффективным инструментом для предсказания аэродинамических характеристик зданий и сооружений. Так, на основе сопоставительного анализа различных моделей установлено, что наилучший прогноз аэродина-

мических коэффициентов из рассмотренных наиболее простых и популярных моделей машинного обучения дает метод случайный лес. Для этого метода проведен сопоставительный анализ результатов расчета аэродинамических коэффициентов сил и моментов (C_x , C_y , C_{Mz}) от параметра угла закручивания формообразующей здания ϕ с результатами CFD-моделирования, показав хорошее совпадение результатов с численным решением в ANSYS CFX (с погрешностью до 5 %), что говорит о высокой степени достоверности полученных результатов машинного обучения.

Результаты настоящего исследования подтверждают применимость методов машинного обучения на базе CFD-моделирования для прогнозирования аэродинамических коэффициентов на здания и сооружения с закручивающейся формообразующей.

Данное направление исследования имеет практическую значимость, связанную с проектированием и оптимизацией аэродинамических характеристик зданий и сооружений, посредством подбора рациональных формообразующих, что дает возможность быстрого и эффективного анализа множества различных вариантов формы. Однако для успешного применения машинного обучения требуется качественная подготовка и предварительная обработка данных, а также правильный выбор и обучение моделей. Необходимо также учитывать ограничения и пределы применимости используемых моделей. Требуется дальнейшая работа для определения оптимальных параметров моделей машинного обучения, а также расширения применимости полученных моделей на другие типы формообразующих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mooneghi M.A., Kargarmoakhar R. Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings : review // Journal of Building Engineering. 2016. Vol. 6. Pp. 225–235. DOI: 10.1016/j.jobe.2016.01.009
2. Stathopoulos T., Alrawashdeh H. Wind loads on buildings: A code of practice perspective // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020. Vol. 206. P. 104338. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104338
3. Сатанов А.А., Васин А.Д. Экспериментальное исследование распределения ветрового давления на высотное здание уникальной формы // Приволжский научный журнал. 2021. № 3 (59). С. 38–46. EDN AANDEZ.
4. Егорычев О.О., Чурин П.С. Экспериментальное исследование ветровых нагрузок на высотные здания // Жилищное строительство. 2015. № 6. С. 20–22. EDN TZVIWT.
5. Saiyan S., Andreev V., Paushkin A. Numerical simulation of accelerations of the upper floors of a high-rise building under wind influence // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 269–279. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_25
6. Belostotsky A., Afanasyeva I., Negrozova I., Goryachevsky O. Simulation of aerodynamic instability of building structures on the example of a bridge section. Part 2: Solution of the problem in a coupled aeroelastic formulation and comparison with engineering estimates // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 24–38. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-24-38
7. Zheng X., Montazeri H., Blocken B. CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES // Building and Environment. 2020. Vol. 173. P. 106747. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106747
8. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines // Energy. 2019. Vol. 180. Pp. 838–857. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.053
9. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы : дис. ... канд. тех. наук. М. : МГСУ, 2010. 198 с. EDN QEVMND.
10. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства : учебное пособие. М. : АСБ, 2017. 720 с.
11. Zhang F.L., Xiong H.B., Shi W.X., Ou X. Structural Health Monitoring of shanghai tower during different stages using a Bayesian approach // Structural Control and Health Monitoring. 2016. Vol. 23. Issue 11. Pp. 1366–1384. DOI: 10.1002/stc.1840
12. Lapin V.A., Yezhanov S.Y., Makish N.K. Monitoring the behavior of a high-rise building under wind loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 953. Issue 1. P. 012087. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012087
13. Колчин В.Н. Специфика применения технологий «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 250–253. EDN JJLECU.
14. Málaga-Chuquitaype C. Machine learning in structural design : an opinionated review // Frontiers in Built Environment. 2022. Vol. 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.815717
15. Sun H., Burton H.V., Huang H. Machine learning applications for building structural design and performance assessment : state-of-the-art review // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 33. P. 101816. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101816

16. *Nguyen P.T.* Application machine learning in construction management // *TEM Journal*. 2021. Pp. 1385–1389. DOI: 10.18421/tem103-48
17. *Lee J., Lee S.* Construction site safety management: A computer vision and deep learning approach // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Issue 2. P. 944. DOI: 10.3390/s23020944
18. *Gomez-Cabrera A., Escamilla-Ambrosio P.J.* Review of machine-learning techniques applied to structural health monitoring systems for building and bridge structures // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 21. P. 10754. DOI: 10.3390/app122110754
19. *Wu T., Snaiki R.* Applications of machine learning to wind engineering // *Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. DOI: 10.3389/fbuilt.2022.811460
20. *Li J., Du X., Martins J.R.R.A.* Machine learning in aerodynamic shape optimization // *Progress in Aerospace Sciences*. 2022. Vol. 134. P. 100849. DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100849
21. *Peng W., Zhang Y., Laurendeau E., Desmaisons M.C.* Learning aerodynamics with neural network // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-022-10737-4
22. *Ahmed S., Kamal K., Ratlamwala T.A., Mathavan S., Hussain G., Alkahtani M. et al.* Aerodynamic analyses of airfoils using machine learning as an alternative to RANS simulation // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 10. P. 5194. DOI: 10.3390/app12105194
23. *Zan B.W., Han Z.H., Xu C.Z., Liu M.Q., Wang W.Z.* High-dimensional aerodynamic data modeling using a machine learning method based on a convolutional neural network // *Advances in Aerodynamics*. 2022. Vol. 4. Issue 1. DOI: 10.1186/s42774-022-00128-8
24. *Yang B.* Wind engineering for high-rise buildings : a review // *Wind and Structures*. 2021. Vol. 32. Issue 3. Pp. 249–265. DOI: 10.12989/was.2021.32.3.249
25. *Sarker I.H.* Machine learning: algorithms, real-world applications and research directions // *SN Computer Science*. 2021. Vol. 2. Issue 3. DOI: 10.1007/s42979-021-00592-x

Поступила в редакцию 20 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 7 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), аспирант кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865; Berformert@gmail.com;

Вероника Борисовна Шелепина — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; veronika.shel@mail.ru.

Вклад авторов:

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

Шелепина В.Б. — сбор и анализ материалов по ML-исследованиям, проведение CFD-моделирования, создание иллюстраций, тестирование моделей машинного обучения, обработка и анализ результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. *Mooneghi M.A., Kargarmoakhar R.* Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings : review. *Journal of Building Engineering*. 2016; 6:225-235. DOI: 10.1016/j.jobbe.2016.01.009
2. *Stathopoulos T., Alrawashdeh H.* Wind loads on buildings: A code of practice perspective. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020; 206:104338. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104338
3. *Satanov A.A., Vasin A.D.* Experimental study of wind pressure distribution on a unique shape high-rise building. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2021; 3(59):38-46. EDN AANDEZ. (rus.).
4. *Egorychev O.O., Churin P.S.* Experimental study of wind loads on high-rise buildings. *Housing Construction*. 2015; 6:20-22. EDN TZVIWT. (rus.).
5. *Saiyan S., Andreev V., Paushkin A.* Numerical simulation of accelerations of the upper floors of a high-rise building under Wind Influence. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 269-279. DOI: 10.1007/978-3-031-10853-2_25
6. *Belostotsky A., Afanasyeva I., Negrozova I., Goryachevsky O.* Simulation of aerodynamic instability of building structures on the example of a bridge section. Part 2: Solution of the problem in a coupled aeroelastic formulation and comparison with engineer-

ing estimates. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(3):24-38. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-24-38

7. Zheng X., Montazeri H., Blocken B. CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES. *Building and Environment*. 2020; 173:106747. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106747

8. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy*. 2019; 180:838-857. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.053

9. Dubinskii S.I. *Numerical modeling of wind effects on high-rise buildings : diss. ... Ph.D.* Moscow, MGSU, 2010; 198. EDN QEVMND. (rus.).

10. Belostotskii A.M., Akimov P.A., Afanas'eva I.N. *Computational aerodynamics in construction problems : textbook*. Moscow, ASV Publ., 2017; 720. (rus.).

11. Zhang F.L., Xiong H.B., Shi W.X., Ou X. Structural Health Monitoring of shanghai tower during different stages using a Bayesian approach. *Structural Control and Health Monitoring*. 2016; 23(11):1366-1384. DOI: 10.1002/stc.1840

12. Lapin V.A., Yerzhanov S.Y., Makish N.K. Monitoring the behavior of a high-rise building under wind loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 953(1):012087. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012087

13. Kolchin V.N. The specifics of the use of "artificial intelligence" technology in construction. *Innovation and Investment*. 2022; 3:250-253. EDN JJLECU. (rus.).

14. Málaga-Chuquitaype C. Machine learning in structural design : an opinionated review. *Frontiers in Built Environment*. 2022; 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.815717

15. Sun H., Burton H.V., Huang H. Machine learning applications for building structural design and performance assessment : state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33:101816. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101816

16. Nguyen P.T. Application machine learning in construction management. *TEM Journal*. 2021; 1385-1389. DOI: 10.18421/tem103-48

17. Lee J., Lee S. Construction site safety management: A computer vision and deep learning approach. *Sensors*. 2023; 23(2):944. DOI: 10.3390/s23020944

18. Gomez-Cabrera A., Escamilla-Ambrosio P.J. Review of machine-learning techniques applied to structural health monitoring systems for building and bridge structures. *Applied Sciences*. 2022; 12(21):10754. DOI: 10.3390/app122110754

19. Wu T., Snaiki R. Applications of machine learning to wind engineering. *Frontiers in Built Environment*. 2022; 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.811460

20. Li J., Du X., Martins J.R.R.A. Machine learning in aerodynamic shape optimization. *Progress in Aerospace Sciences*. 2022; 134:100849. DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100849

21. Peng W., Zhang Y., Laurendeau E., Desmarais M.C. Learning aerodynamics with neural network. *Scientific Reports*. 2022; 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-10737-4

22. Ahmed S., Kamal K., Ratlamwala T.A., Mathavan S., Hussain G., Alkahtani M. et al. Aerodynamic analyses of airfoils using machine learning as an alternative to RANS simulation. *Applied Sciences*. 2022; 12(10):5194. DOI: 10.3390/app12105194

23. Zan B.W., Han Z.H., Xu C.Z., Liu M.Q., Wang W.Z. High-dimensional aerodynamic data modeling using a machine learning method based on a convolutional neural network. *Advances in Aerodynamics*. 2022; 4(1). DOI: 10.1186/s42774-022-00128-8

24. Yang B. Wind engineering for high-rise buildings : a review. *Wind and Structures*. 2021; 32(3):249-265. DOI: 10.12989/was.2021.32.3.249

25. Sarker I.H. Machine learning: algorithms, real-world applications and research directions. *SN Computer Science*. 2021; 2(3). DOI: 10.1007/s42979-021-00592-x

Received May 20, 2023.

Adopted in revised form on October 9, 2023.

Approved for publication on March 7, 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, 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, ORCID: 0000-0003-0694-4865; Berformert@gmail.com;

Veronika B. Shelepina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; veronika.shel@mail.ru.

Contribution of the authors:

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

Veronika B. Shelepina — collection and analysis of ML research materials, conducting CFD modeling, creating illustrations, testing machine learning models, processing and analyzing research results.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.729-739

Численное и экспериментальное исследование поведения защитного сооружения при ударном воздействии

Денис Александрович Тарасов

Пензенский государственный университет (ПГУ); г. Пенза, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с постоянно существующими угрозами умышленного повреждения инфраструктуры критически важных объектов с применением автотранспортных средств становится актуальной и представляет практический интерес задача по разработке и исследованию защитных сооружений, направленных на предотвращение такого рода ущерба. Обосновано применение стальных канатов в качестве основных несущих элементов подобных сооружений.

Материалы и методы. Проведено с помощью предложенного численного алгоритма определение минимально допустимой площади поперечного сечения стальных канатов исходя из требований, предъявляемых к защитному сооружению по стойкости к ударному воздействию, вызванному наездом автомобиля с заданной массой и скоростью движения. В основу разработанного метода положено математическое моделирование задачи условной оптимизации. В качестве целевой функции выступала функция продольного усилия, возникающего в стальных канатах. Вместе с тем предъявлялись требования по соблюдению условий сохранения энергии и неразрывности деформаций, а также ограничения прочности. Выполнен поверочный расчет проектируемого защитного сооружения в коммерческом программном комплексе, реализованном на общепризнанном методе конечных элементов. Представлена методика осуществления натурного эксперимента. Проведен полномасштабный натурный эксперимент с целью определения истинного распределения деформаций по конструктивным элементам объекта испытания при ударном воздействии.

Результаты. Представлены результаты экспериментального исследования. Выполнен сравнительный анализ данных, полученных в процессе численного и компьютерного моделирования, а также в ходе проведения натурного испытания. Установлено незначительное расхождение в значениях контролируемых параметров, полученных разными методами.

Выводы. Предложенный численный алгоритм по поиску минимально допустимой площади поперечного сечения стальных канатов, исходя из требования заданной прочности, подтвердил свою надежность, а принятые конструктивные решения разработанного защитного сооружения свою обоснованность. Результаты исследования могут найти применение при проектировании подобных инженерных сооружений, предназначенных для физической защиты особо важных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: защитное сооружение, противотаранное устройство, стальной канат, гибкая нить, удар, экспериментальное исследование, динамическая нагрузка, напряжения, деформации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тарасов Д.А. Численное и экспериментальное исследование поведения защитного сооружения при ударном воздействии // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 729–739. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.729-739

Автор, ответственный за переписку: Денис Александрович Тарасов, tda82@list.ru.

Numerical and experimental study of the behavior of a protective structure under impact

Denis A. Tarasov

Penza State University (PSU); Penza, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In connection with the constantly existing threats of deliberate damage to the infrastructure of critical facilities using vehicles, the task of development and research of protective structures aimed at preventing this kind of damage becomes relevant and of practical interest. The application of steel ropes as the main load-bearing elements of such structures is substantiated.

Materials and methods. The proposed numerical algorithm was used to determine the minimum permissible cross-sectional area of steel ropes based on the requirements for a protective structure in terms of resistance to impact caused by the collision of a car with a given mass and speed. The developed method is based on mathematical modelling of the conditional optimization problem. The objective function was the function of the longitudinal force arising in the steel ropes. At the same time, requirements were made to comply with the conditions of energy conservation and continuity of deformations, as well as strength limitations. A verification calculation of the designed protective structure was carried out in a commercial software package implemented on the generally recognized finite element method. The methodology of the full-scale experiment is presented. A full-scale experiment was carried out in order to determine the true distribution of deformations over the structural elements of the test object under impact.

Results. The results of the experimental study are presented. A comparative analysis of the data obtained in the process of numerical and computer simulation, as well as in the course of a full-scale test, was carried out. A slight discrepancy in the values of the controlled parameters obtained by different methods was found.

Conclusions. The proposed numerical algorithm for searching the minimum permissible cross-sectional area of steel ropes, based on the requirement of a given strength, confirmed its reliability, and the adopted design solutions of the developed protective structure proved their validity. The results of the research can be used in the design of such engineering structures designed for the physical protection of critical facilities.

KEYWORDS: protective structure, anti-ram device, steel rope, flexible thread, impact, experimental study, dynamic load, stresses, deformations

FOR CITATION: Tarasov D.A. Numerical and experimental study of the behavior of a protective structure under impact. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):729-739. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.729-739 (rus.).

Corresponding author: Denis A. Tarasov, tda82@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют разного рода угрозы, связанные с несанкционированными действиями умышленного характера посторонних лиц с целью проникновения на охраняемую территорию особо важных объектов с использованием автотранспортных средств [1–3]. Под особо важными объектами понимаются объекты, повреждение или нарушение функционирования которых приводит к последствиям в масштабах всей страны [4, 5]. Безопасность внешнего периметра подобной инфраструктуры должна обеспечиваться путем создания элементов физической защиты, гарантированно останавливающих автомобиль при попытке прорыва вглубь территории охраняемого объекта [6–8].

Следовательно, исключительное значение приобретают вопросы, относящиеся к проектированию и устройству специальных инженерных сооружений, обладающих защитными свойствами при ударном воздействии, возникающем при наезде автотранспортного средства [9–12]. Вместе с тем в условиях возрастающих требований, предъявляемых к безопасности особо важных объектов, становится все более актуальным решение задачи по повышению надежности и эффективности применяемых проектных решений, особенно на начальном этапе разработки проекта при назначении конструктивных схем защитных сооружений [13–15].

Из основных теоретических положений механики известно, что любой конструктивный элемент той или иной механической системы при внешнем силовом воздействии наилучшим образом работает на растяжение и значительно хуже сопротивляется изгибу. При этом следует отметить, что с увеличением длины изгибаемый элемент все больше и больше уступает в сопоставлении с элементом, испытывающим растяжение. Данный факт обусловлен тем, что при одинаковом поперечном сечении и нагрузке напряжения, возникающие в максимально нагруженном сечении изгибаемого элемента, в разы больше, чем в материале элемента, подверженного осевому растяжению. Иначе при постоянных значениях нагрузки и максимально-допустимых напряжений в материале элемент, работающий на растяжение, более экономически обоснован, чем элемент, воспринимающий изгибающие моменты, поскольку для сопротивления силовому воздействию без разрушения

требуется меньшая площадь поперечного сечения. В связи с этим в качестве основных силовых элементов, обеспечивающих общую прочность защитных сооружений при ударном воздействии, предлагается использовать стальные канаты. Главной особенностью указанных элементов является то, что они способны работать исключительно на растяжение и не могут воспринимать изгибающие моменты ввиду наличия малой изгибной жесткости [16–18].

На сегодняшний день оценка прочности стальных канатов при действии статических нагрузок ведется с использованием известных методик, для которых расчетной моделью является гибкая нить [19–22]. Наряду с этим при динамическом воздействии широко применяются коммерческие системы компьютерного моделирования, реализующие метод прямого интегрирования уравнений движения по времени, что дает возможность определять усилия и напряжения в элементах геометрически нелинейных конструкций, а также перемещение, скорость и ускорение узлов в любой момент времени [23]. При этом динамическая нагрузка в подобных программных комплексах должна задаваться на узлы как функция силы от времени, таким образом, проектировщик уже на начальном этапе разработки должен знать общий закон изменения во времени силового воздействия. Однако проблема заключается в том, что на этапе проектирования не известна величина продолжительности удара, иначе говоря, значение того промежутка времени, в течение которого происходит падение скорости до нуля и прорывающийся автомобиль останавливается. Из этого следует, что неизвестно ускорение, а значит и действующая на защитное сооружение сила, равная по модулю силе инерции ударяющего автотранспортного средства.

Из вышеперечисленного сформулируем цель исследования следующим образом — оценить прочность и жесткость защитного сооружения с основными несущими элементами, выполненными из стальных канатов при ударном воздействии, вызванном наездом автомобиля с заданной массой и скоростью движения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. По результатам численного моделирования разработать, а затем изготовить и смонтировать объект исследования.

2. Разработать методику проведения натурного эксперимента.

3. Провести экспериментальное исследование по разработанной методике с дальнейшим сравнительным анализом результатов, полученных в ходе численного моделирования.

Объектом исследования является защитное сооружение, представляющее собой противотаранное устройство, конструктивно выполненное в виде шлагбаума.

Предметом исследования выступают усилия и деформации, возникающие в сечениях элементов защитного сооружения, характеризующие его поведение при ударном воздействии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Требование, предъявляемое к проектируемому защитному сооружению, заключается в создании непреодолимого физического препятствия при несанкционированном проезде автотранспортного средства массой $m = 10$ тонн, движущегося со скоростью $v = 60$ км/ч с гарантированным обеспечением его принудительной остановки.

Для определения площади поперечного сечения основных несущих элементов защитного сооружения, выполненных из стальных канатов, рассмотрим расчетную модель гибкой нити (рис. 1).

Гибкая нить, выполненная из материала с модулем упругости E и допускаемыми напряжениями $[\sigma]$, имеет линию начального очертания со стрелой провеса f_0 в середине пролета l , описанную функцией $y_0(x)$. Закреплена на упругоподатливых опорах с жесткостью u , расположенных под углом β . В результате действия приложенной на расстоянии a от опоры A силы P , характеризующейся импульсом ударяющего тела, в гибкой нити возникает продольное усилие $T(A, H, P, x)$ и она приобретает линию конечного очертания, описанную функцией $y(H, P, x)$. В свою очередь продольное усилие состоит из двух составляющих: распора H и балочной поперечной силы $Q_B(P, x)$. Отметим, что в параметры всех функций включены: площадь поперечного сечения F , длина l , модуль упругости E , допускаемые напряжения $[\sigma]$, жесткость u , угол β , стреловидность f_0 и координата x .

чения A , распор H и действующая сила инерции P , поскольку данные величины не известны на момент постановки задачи.

Расчет требуемой площади поперечного сечения рассматриваемого элемента, исходя из ограничения по допускаемым напряжениям, ведется в соответствии с алгоритмом, представленным в виде блок-схемы (рис. 2).

Представленный алгоритм является последовательностью действий:

1. Ввод исходных данных.
2. Разбиение нити по длине.
3. Задание начальных параметров.
4. Определение функции балочной поперечной силы.
5. Определение функции балочного изгибающего момента.
6. Определение функции линии начального очертания.
7. Расчет начальной длины нити.
8. Расчет конечной длины нити.
9. Расчет упругого удлинения.
10. Определение функции линии конечного очертания.
11. Определение функции прогиба.
12. Определение функции продольного усилия.
13. Проверка условий прочности, сохранения энергии и неразрывности деформаций.
14. Приращение параметров.
15. Расчет времени действия инерционной нагрузки.
16. Вывод результатов.

Данная методика более детально представлена в работах [24, 25].

В результате численного моделирования поведения гибкой нити с заданными физическими и геометрическими параметрами, а именно при ударной нагрузке, действующей в середине пролета $l = 8,22$ м, первоначальной стреле провеса $f_0 = 0$ м, жесткости упругоподатливых опор $u = 22\,400$ кН/м, расположенных под углом $\beta = 0$ град., модуле упругости материала $E = 147\,050$ МПа и допускаемых напряжениях $[\sigma] = 1360$ МПа, получены значения сосредоточенной

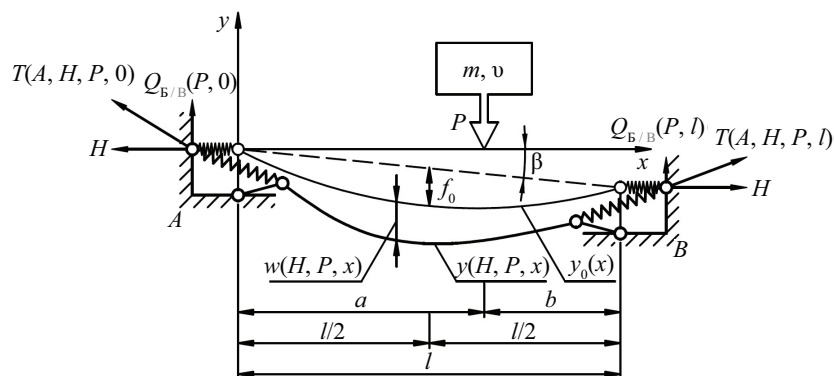


Рис. 1. Расчетная модель гибкой нити

Fig. 1. Calculation model of a flexible thread

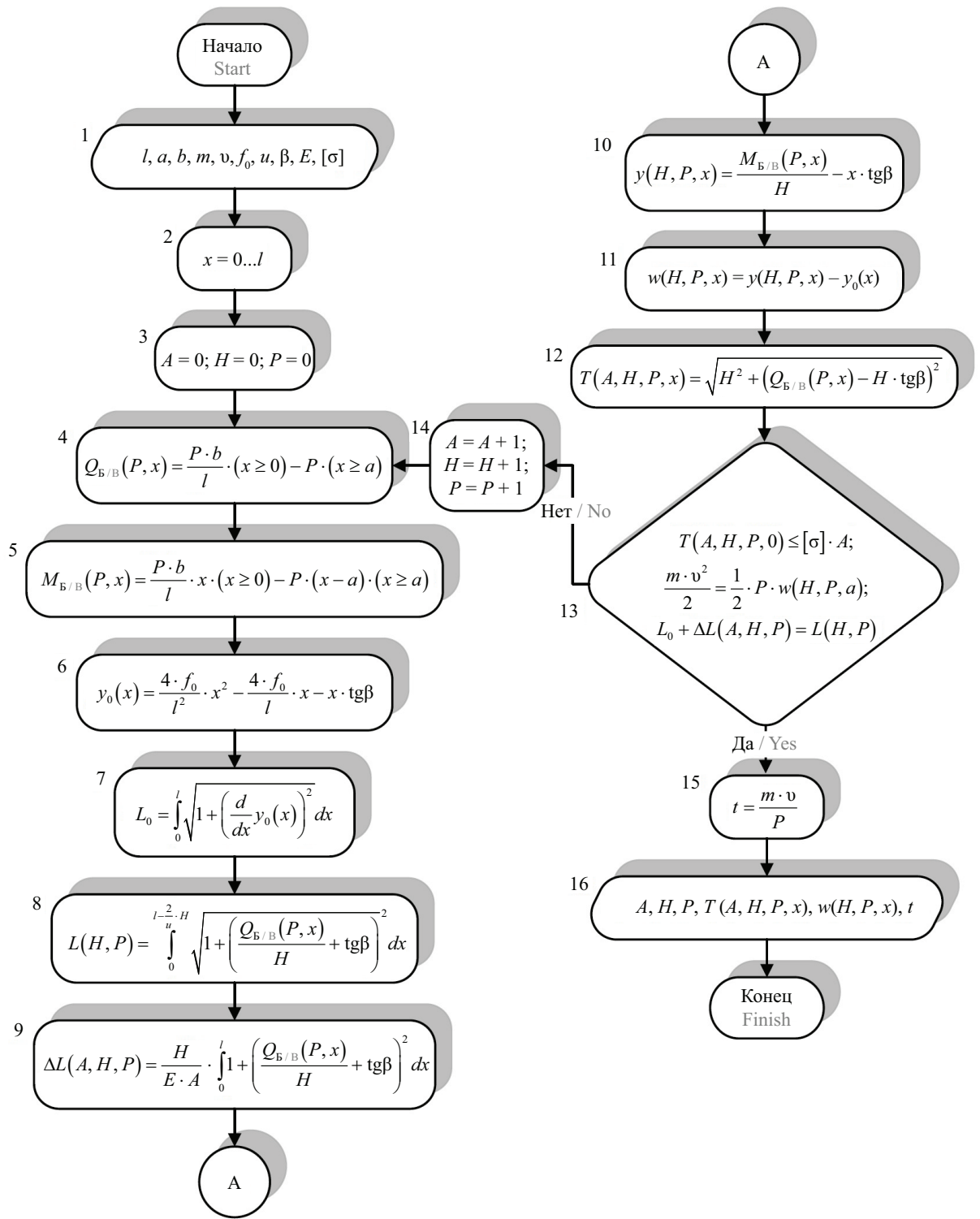


Рис. 2. Алгоритм определения площади поперечного сечения гибкой нити
Fig. 2. Algorithm for determining the cross-sectional area of a flexible thread

нагрузки $P = 816$ кН, являющейся эквивалентом силы инерции ударяющего автомобиля, времени соударения $t = 0,1135$ с, площади поперечного сечения стальных канатов $A = 0,0018878$ м², а также максимальные значения прогиба в середине пролета $w(H, P, l/2) = 1,095$ м и продольного усилия в приопорных сечениях $T(A, H, P, 0) = T(A, H, P, l) = 2567,4$ кН.

Для дальнейшего определения геометрических характеристик опорных конструкций, расположенных ниже основных несущих элементов, выполненных из стальных канатов, а также с целью проверки адекватности результатов, полученных численным методом, проведем компьютерное моделирование поведения защитного сооружения

при динамическом воздействии в коммерческом программном комплексе ЛИРА версии 10.10 релиз 2.4, реализованном на общепризнанном методе конечных элементов.

В качестве параметров динамического воздействия во времени примем значения, найденные на предыдущем этапе численного моделирования (рис. 3).

За критерии оценки адекватности результатов, полученных численным методом и с помощью программного комплекса ЛИРА, примем перемещение стальных канатов в середине пролета защитного сооружения, а также продольное усилие в сечениях, расположенных над опорами.

В ходе расчета в системе компьютерного моделирования ЛИРА получены максимальные значения нормальной растягивающей силы, возникающей в стальных канатах, равной $N = 2144$ кН, и горизонтального перемещения, равного $u = 1,034$ м.

В качестве примера на рис. 4 показано деформированное состояние защитного сооружения, соответствующее максимальным перемещениям в момент времени $t = 0,1134$ с от начала действия динамической нагрузки.

Согласно задачам исследования по результатам проведенного моделирования запроектировано и изготовлено защитное сооружение, конструктивно представляющее собой противотаранный шлагбаум¹. Монтаж объекта исследования выполнен на по-

лигоне испытательной лаборатории для проведения испытаний технических средств обеспечения транспортной безопасности Пензенского государственного университета. Общий вид противотаранного шлагбаума до экспериментального исследования представлен на рис. 5.

Данное техническое решение условно можно представить в виде совокупности двух групп конструктивных элементов: основных (несущих) и вспомогательных. Основные элементы обеспечивают требуемую прочность и жесткость противотаранного шлагбаума при действии силовых факторов, возникающих вследствие таранного удара автотранспортным средством. Вспомогательные элементы предназначены для сопряжения и обеспечения требуемой функциональности несущих элементов.

К основным элементам относятся стальные канаты, штыри из высокопрочной стали, расположенные на концах стрелы противотаранного шлагбаума и наряду с этим две металлические опоры. Все перечисленное совместно с фундаментом образует замкнутую силовую систему во время действия кратковременной динамической нагрузки.

В качестве вспомогательных элементов выступают металлическая рама с установленной стрелой, выполненной из стальной трубы и уравновешенной противовесом, электропривод, а также пластиковый защитный кожух, закрывающий раму с противовесом.

Стальные канаты намотаны по замкнутому контуру вокруг металлических штырей, расположенных на концах стрелы, тем самым труба, из кото-

¹ Противотаранное устройство ЗАО «ЦесИС НИКИРЭТ». URL: <https://cesis.ru/produkcija/ptu/shlagbaumnogo-tipa/protivotarannoe-ustrojstvo-ptu/>

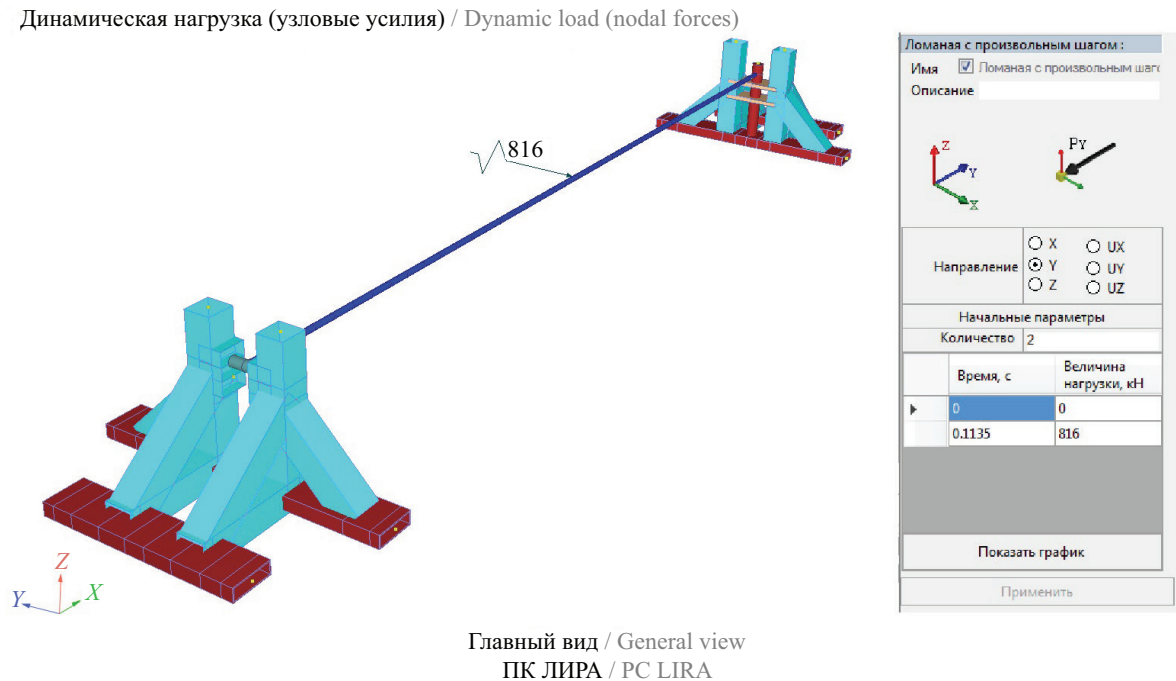


Рис. 3. Расчетная модель защитного сооружения

Fig. 3. Design model of the protective structure

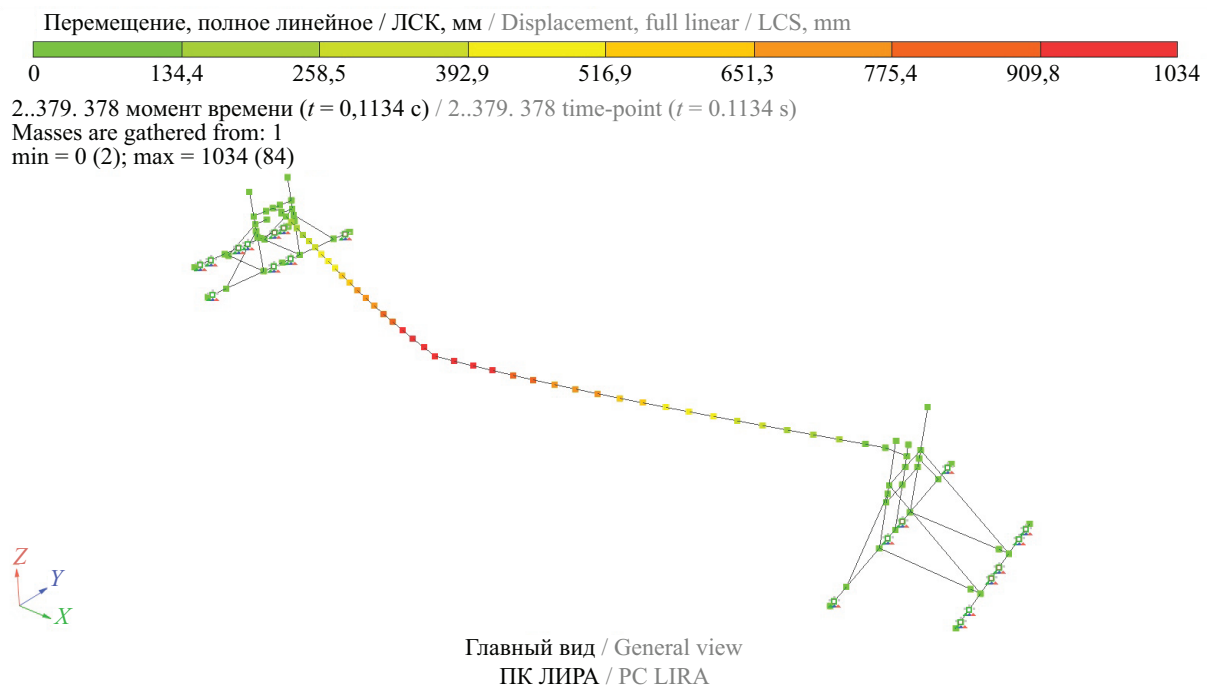


Рис. 4. Деформированное состояние защитного сооружения

Fig. 4. Design model of the protective structure

рой изготовлена стрела барьера, является кожухом для указанных элементов.

В свою очередь металлические штыри на концах стрелы защитного сооружения предназначены для организации пассивного зацепа во время таранного удара автотранспортным средством.

Металлические опоры противотаранного шлагбаума представляют собой пространственные конструкции, сваренные из толстостенных стальных прямоугольных профилей. Основания опор имеют жесткое сопряжение с блоками фундаментных болтов, расположенными в теле фундамента.

Натурное испытание проводится путем наезда на объект исследования грузовым автомобилем

ЗИЛ-130, догруженным железобетонными блоками до требуемой массы $m = 10$ т и разогнанным до скорости $v = 60$ км/ч (рис. 6).

Разгон испытательного автомобиля осуществляется по горизонтальной дороге с твердым покрытием. Прямолинейное движение автотранспортного средства в направлении удара обеспечивается монорельсом, непосредственно по которому перемещается ползун, соединенный с помощью стальной цепи с передней подвеской разгоняемого автомобиля (рис. 6). В свою очередь ползун посредством тягового троса, огибающего систему полиспастов, приводится в движение колесным трактором К-700. Контроль скорости, на которой происходит взаимодействие,



Рис. 5. Общий вид противотаранного шлагбаума до испытания

Fig. 5. General view of the anti-ram barrier before the test



Рис. 6. Общий вид автомобиля ЗиЛ-130 до испытания

Fig. 6. General view of the ZiL-130 car before the test

осуществляется с помощью датчика угла поворота (энкодера), установленного на заднем колесе ударяющего автотранспортного средства (рис. 6).

На расстоянии 4 м от объекта исследования ползун автоматически отделяется от стальной цепи, соединенной с передней подвеской, и испытательный автомобиль продолжает свое дальнейшее движение по инерции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактические климатические условия на момент натурного эксперимента характеризовались температурой окружающего воздуха $+25^{\circ}\text{C}$ и скоростью ветра $0\text{--}1\text{ м/с}$.

В ходе экспериментального исследования стрела противотаранного шлагбаума находилась в горизонтальном положении, тем самым фиксировалось замкнутое состояние силовой системы «канаты – штыри – опоры – фундамент».

На основании данных, полученных с датчика угла поворота, скорость ударяющего автотранспортного средства к моменту контакта с объектом исследования составляла $59,4\text{ км/ч}$. Удар пришелся под прямым углом в середину стрелы защитного сооружения.

Во время таранного удара испытательным автомобилем первой начала деформироваться стрела, при этом совершая кинематические перемещения до тех пор, пока штыри, расположенные на ее концах, не вошли в контакт с опорами барьера.

После полного совершения стрелой кинематических перемещений по выбору зазоров между штырями и опорами произошло разрушение указанного элемента. В это же время в работу по восприятию кратковременной динамической нагрузки вступили стальные канаты, расположенные внутри стрелы противотаранного шлагбаума. Таким образом, стальные канаты через штыри посредством опор передали ударную нагрузку на фундамент.

Общий вид объекта исследования после контакта с автотранспортным средством, которым производился таранный удар, представлен на рис. 7.

Одним из важнейших критериев, характеризующих поведение любой механической системы при внешнем воздействии, являются возникающие при этом деформации. Анализ деформированного состояния, представленного на рис. 7, показал, что максимальный прогиб основных несущих элементов, а именно стальных канатов, расположенных внутри стрелы защитного сооружения, составил значение порядка $1,05\text{ м}$ при цене деления шкалы измерения, равной $0,2\text{ м}$.

Для оценки адекватности результатов, полученных численным методом по предложенному в данном исследовании алгоритму, сведем значения ранее принятых критериев в таблицу.

Анализ приведенных данных в таблице показывает, что полученные результаты с помощью предложенного численного алгоритма имеют хорошую согласованность с данными, зафиксированными в ходе проведения натурного эксперимента, а также



Рис. 7. Общий вид противотаранного шлагбаума и автомобиля ЗиЛ-130 после испытания
Fig. 7. General view of the anti-ram barrier and the ZiL-130 car after the test

Критерии оценки адекватности результатов
Criteria for assessing the adequacy of the results

Метод Method	Критерий оценки Evaluation criteria				
	Максимальный прогиб, м Maximum deflection, m		Максимальное продольное усилие, кН Maximum longitudinal force, kN		
МКЭ FEM	1,034		Δ = 5,57, %	2144	Δ = 16,49, %
Предложенный алгоритм The proposed algorithm	Δ = 4,11, %	1,095		2567,4	
Натурный эксперимент Full-scale experiment		1,05		—	

найденным другим методом расчета как по величине максимального прогиба, так и величине продольного усилия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное конструктивное решение защитного сооружения, представляющее собой противотаранный шлагбаум с основными несущими элементами, выполненными из нескольких витков стального каната, в ходе натурного испытания подтвердило расчетные характеристики по остановке автомобиля с заданной массой и скоростью движения. Наряду с этим проведенный полномасштабный эксперимент позволил определить истинное

распределение деформаций по элементам объекта исследования, возникающих вследствие ударного воздействия, вызванного наездом останавливаемого автотранспортного средства. Выявленное незначительное расхождение в результатах моделирования и данных, полученных экспериментальным путем, свидетельствует о том, что предложенный численный алгоритм по поиску минимально допустимой площади поперечного сечения стальных канатов, исходя из требования заданной прочности, имеет достаточную надежность.

Результаты исследования могут найти применение при проектировании подобных инженерных сооружений, предназначенных для защиты инфраструктуры особо важных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Минаев В.А., Сычев М.П., Севрюков Д.В., Дудолодов В.А. Некоторые аспекты оценки характеристик и применения противотаранных устройств // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 7-8(121-122). С. 45–51. EDN XWC DLV.
2. Tran P., Linforth S., Ngo T., Lumantarna R., Nguyen T. Design analysis of hybrid composite anti-ram bollard subjected to impulsive loadings // Composite Structures. 2018. Vol. 189. Pp. 598–613. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.093
3. Шнякина Е.А. Имитационная модель оценки эффективности систем физической защиты объектов // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77. № 6. С. 263–268. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-6-263-268 EDN LVJLXB.
4. Костин В.Н. Методика формирования элементов структуры организационного управления систем физической защиты на основе информационного подхода // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2020. Т. 70. № 1. С. 30–39. DOI: 10.14357/20790279200104 EDN DMVROZ.
5. Костин В.Н. Задачи концептуального проектирования физической защиты критически важных объектов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 1. С. 58–67. EDN UPNQEB.
6. Демьянушко И.В., Михеев П.С., Медведев М.М. Особенности конструкций дорожных мобильных фронтальных ограждений и расчеты при проектировочном анализе // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 2 (32). EDN WUGDLP.
7. Zhang Y., Li R., Heng K., Hu F. Dynamic behaviors of optimized K12 anti-ram bollards // Symmetry. 2022. Vol. 14. Issue 8. P. 1703. DOI: 10.3390/sym14081703
8. Bruski D., Burzyński S., Witkowski W. Analysis of passenger car crash with a cable barrier installed with anti-glare screens on a horizontal convex road curve with 400 m radius // International Journal of Impact Engineering. 2023. Vol. 173. P. 104486. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104486
9. Carter S.D., Rilett L.R. Evaluation of department of defense installation entry control facilities using microsimulation // Transportation Research Record. 2023. Vol. 2677. Issue 3. Pp. 128–144. DOI: 10.1177/03611981221114116
10. Salem S., Campidelli M., El-Dakhkhni W., Tait M. Resilience-based design for blast risk mitigation: Learning from natural disasters // Resilient structures and infrastructure. 2019. Pp. 177–194. DOI: 10.1007/978-981-13-7446-3_7
11. Ивченко В.И., Шмелёв А.В., Талалуев А.В., Омелюсик А.В. Методические рекомендации по топологической оптимизации силовых конструкций с применением средств численного моделирования // Механика машин, механизмов и материалов. 2022. Vol. 4 (61). Pp. 68–79. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-4-61-68-79. EDN FIHNIA.
12. Chen X., Agrawal A., El-Tawil S., Xu X., Cao R., Wong W. Inelastic behavior of a bridge bent subjected to truck impact: Experimental and computational study // Engineering Structures. 2019. Vol. 199. Issue 6. P. 109543. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109543
13. Chen L., Wu H., Liu T. Vehicle collision with bridge piers: A state-of-the-art review // Advances in Structural Engineering. 2021. Vol. 24. Issue 2. Pp. 385–400. DOI: 10.1177/1369433220953510
14. Jalaluddin N.F.M., Said C.S. Sorotan Literatur Kajian kes penggunaan metod TRIZ dalam menyelesaikan masalah // Rumpun Jurnal Persuratan Melayu. 2021. Vol. 9. Issue 2. Pp. 48–57. URL: <https://rumpun-jurnal.com/jurnal/index.php/rumpun/article/view/145>
15. Kamel H. Review of design techniques of armored vehicles for protection against blast from improvised explosive devices // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers. 2019. Vol. 83501. P. V013T13A001. DOI: 10.1115/IMECE2019-10227
16. Ma J., Guo Y. Stress analysis of steel wire in strand based on optical lever principle and finite element calculation // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020. Vol. 42. Pp. 1–10. DOI: 10.1007/s40430-019-2120-1
17. Gurevich L., Danenko V., Bogdanov A., Kulevich V. Analysis of the stress-strain state of steel closed ropes under tension and torsion // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 118. Issue 1–2. Pp. 15–22. DOI: 10.1007/s00170-021-07128-w
18. Palit P., Kushwaha S., Mathur J., Chaturvadi A. Life cycle assessment of wire rope used in crane application in a steel plant // Journal of failure analysis and prevention. 2019. Vol. 19. Issue 3. Pp. 752–760. DOI: 10.1007/s11668-019-00655-5
19. Ereemeev P.G., Vedyakov I.I., Zvezdov A.I. Suspension large span roofs structures in Russia // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 2. Pp. 34–42. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN NBSNNA.
20. Jiang Z., Liu X., Shi K., Lin Q., Zhang Z. Catenary equation-based approach for force finding of cable domes // International Journal of Steel Structures. 2019. Vol. 19. Pp. 283–292. DOI: 10.1007/s13296-018-0117-8
21. Jia L., Zhang C., Jiang Y.M., Cheng J., Xiao R. Simplified calculation methods for static behaviors of triple-tower suspension bridges and parametric study // International Journal of Steel Structures. 2018. Vol. 18. Issue 2. Pp. 685–698. DOI: 10.1007/s13296-018-0028-8
22. Song T., Wang B., Song Y. A simplified calculation method for multi-tower self-anchored suspension bridges based on frame structure theory model // International Journal of Steel Structures. 2022. Vol. 22. Issue 1. Pp. 373–388. DOI: 10.1007/s13296-022-00581-7
23. Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Расчет цилиндрических сетчатых покрытий с учетом уравнений

движения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN JCAXAA.

24. Тарасов Д.А., Коновалов В.В., Данилов А.Л., Бобылев А.И. Определение области несущей способности гибкой нити при действии поперечного

удара // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 2 (54). С. 40–43. DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0007. EDN FKUILU.

25. Тарасов Д.А. Параметрическая оптимизация стальных канатов при действии поперечного удара // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 2 (24). С. 56–62. EDN TYVZHD.

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 1 марта 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Денис Александрович Тарасов** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем безопасности; **Пензенский государственный университет (ПГУ)**; 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40; SPIN-код: 7690-5877, Scopus: 57204116511, ORCID: 0000-0001-7685-0325; tda82@list.ru.

REFERENCES

1. Minaev V.A., Sychev M.P., Sevryukov D.V., Dudoladov V.A. Some aspects of performance evaluation and application of anti-vehicle devices. *Questions of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*. 2018; 7-8(121-122):45-51. EDN XWCDLV.
2. Tran P., Linforth S., Ngo T., Lumantarna R., Nguyen T. Design analysis of hybrid composite anti-ram bollard subjected to impulsive loadings. *Composite Structures*. 2018; 189:598-613. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.093
3. Shnyakina E.A. Simulation model for efficiency evaluation of the objects physical protection systems. *Automation. Modern Technologies*. 2023; 77(6):263-268. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-6-263-268. EDN LVJLXB.
4. Kostin V.N. Formation technique of elements of the structure of organizational management of physical protection systems based on the information approach. *Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences (ISA RAS)*. 2020; 70(1):30-39. DOI: 10.14357/20790279200104. EDN DMVROZ.
5. Kostin V.N. Tasks of conceptual design of physical protection of critically important objects. *Tasks of Conceptual Design of Physical Protection of Critically Important Objects*. 2020; 1:58-67. EDN UPNQEB.
6. Demyanushko I.V., Mikhnev P.S., Medvedev M.M. Features of structures of road mobile frontal barriers and calculations in design analysis. *Avtomobil. Road. Infrastructure*. 2022; 2(32). EDN WUGDLP.
7. Zhang Y., Li R., Heng K., Hu F. Dynamic behaviors of optimized K12 anti-ram bollards. *Symmetry*. 2022; 14(8):1703. DOI: 10.3390/sym14081703
8. Bruski D., Burzyński S., Witkowski W. Analysis of passenger car crash with a cable barrier installed with anti-glare screens on a horizontal convex road curve with 400 m radius. *International Journal of Impact Engineering*. 2023; 173:104486. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104486
9. Carter S.D., Rilett L.R. Evaluation of department of defense installation entry control facilities using microsimulation. *Transportation Research Record*. 2023; 2677(3):128-144. DOI: 10.1177/03611981221114116
10. Salem S., Campidelli M., El-Dakhakhni W., Tait M. Resilience-based design for blast risk mitigation: Learning from natural disasters. *Resilient Structures and Infrastructure*. 2019; 177-194. DOI: 10.1007/978-981-13-7446-3_7
11. Ivchenko V.I., Shmialiou A.V., Talaluev A.V., Omeliusik A.V. Methodological recommendations on topological optimization of power structures using numerical modeling tools. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2022; 4(61):68-79. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-4-61-68-79 EDN FIHNIA
12. Chen X., Agrawal A., El-Tawil S., Xu X., Cao R., Wong W. Inelastic behavior of a bridge bent subjected to truck impact: Experimental and computational study. *Engineering Structures*. 2019; 199(6):109543. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109543
13. Chen L., Wu H., Liu T. Vehicle collision with bridge piers: A state-of-the-art review. *Advances in Structural Engineering*. 2021; 24(2):385-400. DOI: 10.1177/1369433220953510
14. Jalaluddin N.F.M., Said C.S. Sorotan Literatur Kajian kes penggunaan metod TRIZ dalam menyelesaikan masalah. *Rumpun Jurnal Persuratan Melayu*. 2021; 9(2):48-57. URL: <https://rumpunjurnal.com/jurnal/index.php/rumpun/article/view/145>
15. Kamel H. Review of design techniques of armored vehicles for protection against blast from Improvised Explosive Devices. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. *American Society of Mechanical Engineers*. 2019; 83501:V013T13A001. DOI: 10.1115/IMECE2019-10227
16. Ma J., Guo Y. Stress analysis of steel wire in strand based on optical lever principle and finite element calculation. *Journal of the Brazilian Society of Mechan-*

cal Sciences and Engineering. 2020; 42:1-10. DOI: 10.1007/s40430-019-2120-1

17. Gurevich L., Danenko V., Bogdanov A., Kulevich V. Analysis of the stress-strain state of steel closed ropes under tension and torsion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022; 118(1-2):15-22. DOI: 10.1007/s00170-021-07128-w

18. Palit P., Kushwaha S., Mathur J., Chaturvedi A. Life cycle assessment of wire rope used in crane application in a steel plant. *Journal of failure Analysis and Prevention*. 2019; 19(3):752-760. DOI: 10.1007/s11668-019-00655-5

19. Eremeev P.G., Vedyakov I.I., Zvezdov A.I. Suspension large span roofs structures in Russia. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(2):34-42. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN NBSNA.

20. Jiang Z., Liu X., Shi K., Lin Q., Zhang Z. Catenary equation-based approach for force finding of cable domes. *International Journal of Steel Structures*. 2019; 19:283-292. DOI: 10.1007/s13296-018-0117-8

21. Jia L., Zhang C., Jiang Y., Cheng J., Xiao R. Simplified calculation methods for static behaviors

of triple-tower suspension bridges and parametric study. *International Journal of Steel Structures*. 2018; 18(2):685-698. DOI: 10.1007/s13296-018-0028-8

22. Song T., Wang B., Song Y. A simplified calculation method for multi-tower self-anchored suspension bridges based on frame structure theory model. *International Journal of Steel Structures*. 2022; 22(1):373-388. DOI: 10.1007/s13296-022-00581-7

23. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Calculation of cylindrical mesh coatings based on equations of motion. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2023; 25(3):112-119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN JCAXAA.

24. Tarasov D.A., Konovalov V.V., Danilov A.L., Bobylev A.I. Determination of the region of carrying capacity of a flexible thread during action cross impact. *XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus*. 2021; 10(2):40-43. DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0007. EDN FKUILU.

25. Tarasov D.A. Parametric optimization of steel ropes under lateral impact. *XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus*. 2015; 2(24):56-62. EDN TYVZHD.

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on March 1, 2024.

Approved for publication on March 1, 2024.

B I O N O T E S: **Denis A. Tarasov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automated Security Systems; **Penza State University (PSU)**; 40 Krasnaya st., Penza, 440026, Russian Federation; SPIN-code: 7690-5877, Scopus: 57204116511, ORCID: 0000-0001-7685-0325; tda82@list.ru.

Опыт применения Еврокодов при проектировании стальных конструкций в Республике Беларусь

Андрей Брониславович Шурин¹, Виталий Валерьевич Надольский^{1,2}

¹ Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь;
² Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Республика Беларусь — одна из первых стран на территории СНГ, которая ввела в действие на своей территории европейские нормы проектирования (Еврокоды), сохранив при этом действие строительных норм, разработанных на основе советских СНиПов. В республике накоплен значительный опыт применения и сравнительного анализа этих двух систем нормирования. Актуальность исследования заключается в обнаружении наиболее отличительных особенностей нормативных документов, на основании которых можно определить дальнейшие направления научных исследований и совершенствования отечественных норм.

Материалы и методы. Применены сравнительный анализ и сравнение требований Еврокодов и отечественных нормативных документов (СП 16.13330) в области проектирования стальных конструкций. Результаты сравнительного анализа систематизированы и схематизированы в табличном виде. Анализ подкреплен обобщением практического опыта применения в практике проектирования и строительства стальных конструкций, запроектированных согласно требованиям Еврокодов на территории Республики Беларусь. Сопоставлены параметры конструкционной надежности, в том числе выполнен критический анализ значений частных коэффициентов, классификации сечений, особенности конструирования и расчета сварных и болтовых соединений, бесфасоночных узлов из прямоугольных труб.

Результаты. Представлены результаты обобщения опыта применения и сравнительного анализа Еврокода по отношению к СП применительно к проектированию стальных конструкций. Приведен анализ учета частных коэффициентов и классификации поперечных сечений, сравнение конструирования сварных и болтовых соединений, бесфасоночных узлов из прямоугольных труб.

Выводы. Методологические подходы к проверкам предельных состояний и обеспечению надежности стальных конструкций в СП и Еврокодах носят очень близкий характер, однако существуют различия в значениях и наборах частных коэффициентов. При проектировании стальных конструкций по Еврокоду из стальных профилей по ГОСТ 27772 методы классификации поперечных сечений прокатных профилей, выпускаемых по ГОСТ или ТУ, нуждаются в корректировке. Еврокод 3 предоставляет больше возможностей при проектировании сварных и болтовых соединений по конструированию бесфасоночных узлов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нормы проектирования, Еврокод, коэффициенты надежности, устойчивость, предел текучести, узлы и соединения, болтовые соединения, сварные соединения, бесфасоночные узлы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шурин А.Б., Надольский В.В. Опыт применения Еврокодов при проектировании стальных конструкций в Республике Беларусь // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 740–751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751

Автор, ответственный за переписку: Андрей Брониславович Шурин, shuryn@mail.ru.

Experience of implementation of Eurocodes in the design of steel structures in the Republic of Belarus

Andrei B. Shuryn¹, Vitali V. Nadolski^{1,2}

¹ Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus;
² Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The Republic of Belarus is one of the first countries on the territory of the CIS, which introduced European design standards (Eurocodes) on its territory, while preserving the effect of building standards developed on the basis of Soviet SNiP. The republic accumulated considerable experience in the practical application and comparative analysis of these two systems of standards. The relevance of this study is contained in the discovery of the most distinctive features of normative documents, on the basis of which it is possible to determine further directions of scientific research and improvement of domestic norms.

Materials and methods. Analysis and generalization of experience.

Results. The paper presents the results of generalization of the experience of practical application and comparative analysis of Eurocode and CP in relation to the design of steel structures. The analysis of partial factors, classification of cross sections, welded and bolted joints is given.

Conclusions. Methodological approaches to checking limit states and ensuring the reliability of steel structures in CP and Eurocodes are very similar, but there are differences in the values and sets of partial factors. When designing steel structures according to Eurocode, the methods of classification of cross-sections of rolled profiles produced according to GOST or TS need to be adjusted. Eurocode 3 provides more possibilities in the design of welded and bolted joints.

KEYWORDS: design standards, Eurocode, reliability factors, stability, yield strength, connections and joints, bolted joints, welded joints, fascia-free joints

FOR CITATION: Shuryin A.B., Nadolski V.V. Experience of implementation of Eurocodes in the design of steel structures in the Republic of Belarus. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):740-751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751 (rus.).

Corresponding author: Andrei B. Shuryin, shuryin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Республика Беларусь — одна из первых стран на территории СНГ, которая ввела в действие на своей территории европейские нормы проектирования (Еврокоды), сохранив при этом действие строительных норм, разработанных на основе советских СНиПов. Первый этап внедрения был начат в 01.01.2010 г., далее шел пятилетний период альтернативного использования Еврокодов и отечественных документов, потом были попытки перехода полностью на европейскую систему нормативных документов, но опыт применения в практике проектирования и строительства привел к пониманию необходимости создания национальных норм, которые в большей степени гармонизированы с Еврокодами, но при этом позволяют учитывать территориальные и национальные особенности. За последнее десятилетие накоплен значительный опыт использования и сравнительного анализ этих двух систем нормирования.

Цель исследования — обобщение опыта применения и систематизация сравнительного анализа Еврокодов по отношению к СП 16.13330¹ применительно к проектированию стальных конструкций. Актуальность данного исследования заключается в обнаружении наиболее отличительных особенностей нормативных документов, на основании которых можно определить дальнейшие направления научных исследований и совершенствования норм.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании применен сравнительный анализ и сравнение требований европейских стандартов (Еврокодов) и отечественных нормативных документов (СП 16.13330) в области проектирования стальных конструкций.

Еврокоды (Eurocode) — комплект гармонизированных стандартов для расчета несущих строительных конструкций, разработанных техническим комитетом CEN/TC 250 и устанавливающих единые подходы к проектированию несущих строительных конструкций. На сегодняшний день комплект Еврокодов включает десять стандартов (EN 1990–1999), каждый из которых в свою очередь делится на части. Всего разработано 58 частей. Все Еврокоды базируются на едином стандарте надежности — EN 1990.

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. 2017. 140 с.

В то же время в основе документов, базирующихся на основе советских СНиПов, лежит ГОСТ 27751.

Результаты сравнительного анализа систематизированы и схематизированы в табличном виде. Анализ подкреплен обобщением практического опыта применения в практике проектирования и строительства стальных конструкций, запроектированных согласно требованиям Еврокодов на территории Республики Беларусь. Сопоставлены параметры конструкционной надежности, в том числе выполнен критический анализ значений частных коэффициентов, классификации сечений, особенности конструирования и расчета сварных и болтовых соединений, бесфасоночных узлов из прямоугольных труб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коэффициенты надежности. В системе нормативных документов СП РФ и Еврокодов используется метод предельных состояний [1–3]. Для практического применения обе системы нормативных документов реализуют метод коэффициентов надежности как базовой метод проверки предельных состояний [4–7]. Доминирующей причиной различия в значениях коэффициентов надежности является разный уровень целевой надежности, заложенный при определении и калибровке частных коэффициентов² [8–11]. Общая структура коэффициентов надежности в СП и Еврокодах очень схожа. Одни коэффициенты надежности применяются к нагрузкам и учитывают изменчивость нагрузки и погрешность (упрощения) модели нагрузки, погрешность статического расчета, идеализации расчетной модели и т.д. Другие коэффициенты надежности применяются для несущей способности и учитывают изменчивость предела текучести или другой характеристики свойства материала, упрощения и изменчивость геометрических размеров сечения конструкции, погрешность модели несущей способности и т.д. Можно выделить еще одну группу коэффициентов, направленных на дифференциацию надежности, т.е. на учет разных уровней последствий наступления отказа конструкции.

Как результат вышеотмеченного можно констатировать, что общие подходы к определению значений и структуре коэффициентов надежности

² Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23–81* «Стальные конструкции») ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 148 с.

совпадают. Однако значения и набор частных коэффициентов существенно отличаются. Рассмотрим далее более подробно эти различия применительно к стальным конструкциям.

Согласно СП 16.13330 обобщенно расчетное значение несущей способности может быть представлено в следующем виде:

$$R_d = \varphi \cdot z \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m} \cdot \gamma_c, \quad (1)$$

где R_d — расчетное значение несущей способности; φ — коэффициент для учета потери устойчивости, если выполняется проверка устойчивости; z — геометрическая характеристика поперечного сечения элемента (например, площадь для сжатого элемента или момент сопротивления для изгибаемого); R_{yn} — нормативное значение предела текучести; γ_m — коэффициент надежности по материалу; γ_c — коэффициент условий работы.

Коэффициенты надежности по материалу γ_m позволяют перейти от нормативного значения к расчетному и учитывают методы контроля качества металлопроката на металлургических предприятиях.

Коэффициенты условий работы γ_c введены преимущественно для учета погрешностей или упрощений моделей несущей способности [9], к которым можно отнести:

- упрощения при расчетах на общую устойчивость сплошных балок, которые рассчитываются как идеально упругие системы;
- расчет сжатых элементов из одиночных уголков, прикрепляемых одной полкой, как центрально-сжатых стержней, хотя схема их работы соответствует внецентренному сжатию;
- повышенные начальные искривления сжатых составных элементов таврового сечения из уголков, в которых в связи с несимметричным расположением швов при приварке прокладок между уголками начальные искривления превышают учитываемые в базовых расчетных моделях;
- локальное повышение прочностных свойств стали возле отверстий при расчете на прочность сечений, ослабленных отверстиями для болтов и т.д.

В то же время согласно EN 1993-1-1³ расчетное значение несущей способности стального элемента может быть представлено в выражении, очень близком к (1), но в других обозначениях:

$$R_d = \frac{\chi \cdot z \cdot f_y}{\gamma_{Mi}}, \quad (2)$$

где χ — коэффициент для учета потери устойчивости (аналог коэффициента φ в СП 16.13330); f_y — характеристическое значение предела текучести; γ_{Mi} — коэффициент надежности для несущей способности, принимается равным γ_{M0} при про-

верке предельного состояния сечения по прочности или γ_{M1} при проверке предельного состояния по устойчивости.

Нормативное значение R_{yn} согласно СП 16.13330 и характеристическое значение f_y согласно EN 1993-1-1 назначаются на основании статистических данных исходя из 5%-ного квантиля, т.е. в теоретическом плане эти значения должны совпадать. В стандартах есть различия в значениях R_{yn} и f_y , обусловленные преимущественно разной зависимостью от толщины проката. В СП используется более мелкое разделение в зависимости от толщины проката. В соответствии с табл. 3.1 EN 1993-1-1 значения предела текучести разделены для толщин менее и более 40 мм. При этом согласно СП 16.13330 (табл. В.3) для такой широко распространенной стали как С355 значение предела текучести дано для 11 диапазонов толщин, что позволяет более реалистично учесть работу стали.

Коэффициенты надежности γ_{M0} и γ_{M1} учитывают интегрально изменчивость предела текучести и погрешность моделирования несущей способности. Большую критику вызывают значения коэффициентов γ_{M0} и γ_{M1} . То есть в методологическом плане коэффициенты надежности γ_{M0} и γ_{M1} могут быть представлены/выражены через коэффициенты надежности γ_m и γ_c следующим образом:

$$\gamma_{Mi} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c}. \quad (3)$$

Таким образом, на первых этапах введения европейских норм в Республике Беларусь и Казахстане коэффициенты надежности были представлены в национальных приложениях, однако дальнейший опыт и анализ показал, что прямое использование выражения (3) с значениями коэффициентов надежности согласно СП не в полной мере корректно. Как было отмечено выше, коэффициент условий работы γ_c связан с моделями сопротивления и поэтому значения этого коэффициента по СП справедливы только для моделей и допущений, принятых в СП.

В базовой редакции EN 1993-1-1 и в большинстве стран Евросоюза коэффициенты γ_{M0} и γ_{M1} приняты равными единице, хотя их значения могут быть установлены в национальных приложениях. Первичный анализ значений этих коэффициентов может привести к следующим выводам:

- все модели несущей способности с позиции коэффициентов надежности в Еврокоде приравнены к одному уровню точности, в системе норм СП РФ, наоборот, введен коэффициент условий работы γ_c , который дифференцирует модели по степени точности (допущений). Анализ публикаций по калибровке частных коэффициентов [12–15] показывает, что были использованы обобщенные модели, т.е. усредненные, и в целом подтверждает этот вывод. Авторам неизвестна точная причина этого усреднения, или это было выполнено преднамеренно в качестве некоторой степени упрощения, или данное допу-

³ EN 1993-1-1:2005. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. 88 с.

щение было сделано из-за недостатка информации о точности моделей несущей способности;

- применяя коэффициенты надежности γ_{M0} и γ_{M1} , равные единице, выходит, что нормативное значение предела текучести равно расчетному, что не согласуется с базовыми положениями метода частных коэффициентов. Однако, анализируя результаты работ^{4,5} [16, 17], можно заметить, что модели несущей способности, принятые в Еврокоде, были подогнаны таким образом, чтобы обеспечивать 5%-ный квантиль. Тогда становится понятно, что значения коэффициентов надежности γ_{M0} и γ_{M1} могут быть даже меньше единицы из-за консерватизма расчетных моделей, и поэтому в этом нет ничего противоречащего теоретическим предпосылкам, хотя данная ситуация и очень непривычна для инженеров и ученых на постсоветском пространстве.

Классификация поперечных сечений. Еврокод 3 устанавливает 4 класса поперечных сечений. Приведенная в EN 1993-1-1 классификация поперечных сечений учитывает ограничения возможности развития пластических деформаций из-за потери местной устойчивости (устойчивость частей сечения) по нормальным напряжениям. Класс сечения в дальнейшем влияет на вид формулы сопротивления [18, 19]. Поперечное сечение классифицируется по наивысшему (менее благоприятному) классу его

сжатых частей (рис. 1). Следует отметить, что классификация сечений не влияет на вид проверки сечения по касательным напряжениям и требует дополнительных проверок с учетом потери местной устойчивости от касательных напряжений.

В соответствии с требованиями СП 16.13330 в зависимости от напряженно-деформированного состояния расчетного сечения подразделяются на три класса. Сравнение классификации на примере для изгибаемых элементов EN 1993-1-1 и СП 16.13330 приведено на рис. 2.

Классификация сечений в Еврокоде и СП построена на единых предпосылках, однако практическое применение осложняется тем, что номера классов в двух документах сделаны противоположными.

Определим класс поперечного сечения центрально-сжатого стержня из горячекатаного уголка L125 × 8 по ГОСТ 8509⁶ из стали С255.

Так как:

$$\frac{h}{t} = \frac{125}{8} = 15,13 > 15\epsilon = 15 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 15 \sqrt{\frac{235}{255}} = 14,14,$$

то уголок L125 × 8 по ГОСТ 8509 из стали С255 относится к 4 классу поперечного сечения. Следовательно, возможна потеря местной устойчивости полки уголка, расчет уголка по EN 1993-1-1 следует вести по эффективному поперечному сечению.

⁶ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. 1993. 9 с.

⁴ JCSS Probabilistic Model Code, Joint Committee of Structural Safety. 2001.
⁵ CEN TC250 / Ad Hoc Group Reliability of Eurocodes (convenor – Ton Vrouwenvelder) Technical Report for the reliability background of Eurocodes. Draft June 2021. P. 165.

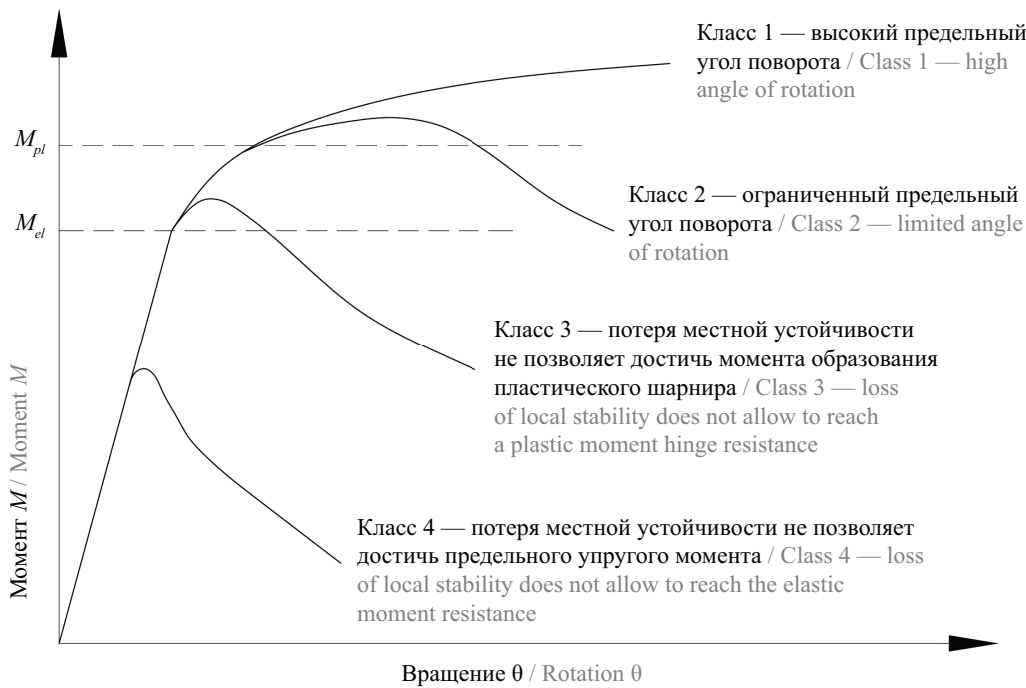


Рис. 1. Зависимость изгибающего момента в сечении от класса поперечного сечения по EN 1993-1-1 [20]

Fig. 1. Dependence of the bending moment on the cross-section class according to EN 1993-1-1 [20]

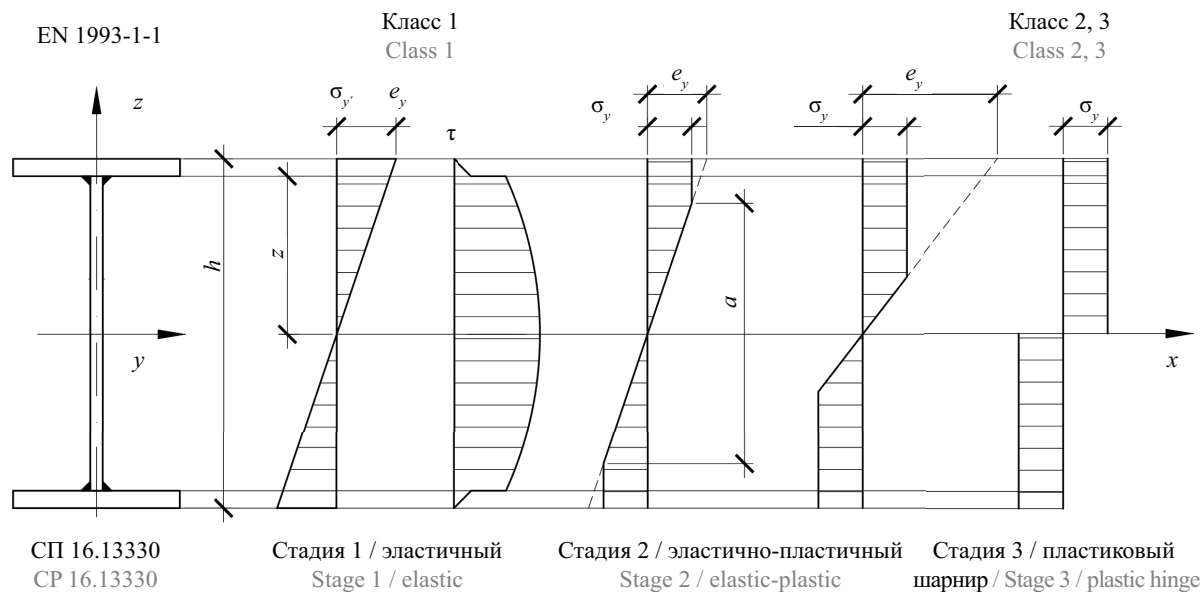


Рис. 2. Сравнение классификации поперечных сечений по EN 1993-1-1 и СП 16.13330 на примере изгибаемых элементов

Fig. 2. Comparison of the classification of cross sections according to EN 1993-1-1 and CP 16.13330 on the example of bending elements

Выполняя аналогичные расчеты для всех уголков по ГОСТ 8509 и 8510⁷, получим, что до 30 % наиболее «ходовых» уголков относится к 4 классу, что подразумевает дальнейшую проверку несущей способности с применением редуцированных характеристик сечения [21, 22]. В то же время традиционно в отечественной практике проверка местной устойчивости свесов полок и стенки горячекатаных профилей не требуется, поскольку она обеспечена прокатом. В отечественной практике фермы из уголков зарекомендовали себя как надежные, и опыт эксплуатации не свидетельствует о потере местной устойчивости частей сечения.

Расчет и конструирование соединений. Расчет соединений представлен в части 1-8 и состоит из:

- расчета и конструирования болтовых (включая соединения на заклепках и штифтах) и сварных соединений;
- раздела, посвященного определению жесткости узлов;
- расчета и конструирования узлов из двутавров, бесфасоночных узлов из гнутосварных профилей и круглых труб.

Еврокод накладывает ограничения на применяемые в конструкциях сварочные материалы, болты, гайки и шайбы: проектировщик должен использовать материалы, соответствующие ссылочным стандартам, приведенным в п. 1.2.4 и 1.2.5 EN 1993-1-8⁸.

⁷ ГОСТ 8510–86. Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. Сортамент. 1986. 10 с.

⁸ EN 1993-1-8:2005. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений. 128 с.

Отличия в конструировании болтовых соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8 приведены в табл. 1 [23].

Расчет сварных швов в части 1-8 Еврокода 3 производится по эффективной высоте сварного шва a , равной высоте вписанного в сварной шов треугольника (рис. 3), что позволяет рассчитать угловые, круговые угловые (рис. 4, a), стыковые, пробочные сварные швы (рис. 4, b), а также сварные швы с клинообразным зазором (рис. 3, b).

Основные отличия в расчете и конструировании сварных соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8 приведены в табл. 2 [23].

Классификация и моделирование узлов. Еврокод позволяет расчетным методом определить жесткость узла и учесть влияние работы соединений на распределение внутренних сил и моментов в конструкции, а также на общие деформации конструкции. Поэтому узлы в зависимости от их начальной вращательной жесткости $S_{j,ini}$ классифицируются на жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие. В зависимости от прочности узлы классифицируются на номинально-шарнирные, равнопрочные и частично равнопрочные.

Конструирование бесфасоночных узлов из прямоугольных труб. Использование европейских норм при проектировании бесфасоночных узлов из гнутосварных профилей значительно расширяет их область применения (табл. 3).

1. В п. 7.2.2 EN 1993-1-8 значительно расширены критерии проверок бесфасоночных узлов:

- отказ лицевой поверхности пояса (отказ вследствие пластического разрушения лицевой поверхности пояса) или пластификация пояса (отказ вследствие

Табл. 1. Конструирование болтовых соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8

Table 1. Construction of bolted joints according to CP 16.13330 and EN 1993-1-8

Параметр Parameter	СП 16.13330 CP 16.13330	EN 1993-1-8
Применение метизов по ГОСТ Application of screws according to GOST	Да Yes	Не допускается (только соответствующие ссылочным стандартам EN ISO) Not allowed (only in accordance with EN ISO standards)
Наличие классификации болтовых соединений Classification of bolted connections	Отсутствует Absent	Да Yes
Разрешенные к применению болты классов прочности Allowed bolts of strength classes	5,6, 5,8, 8,8 ... 12,9	4,6–10,9
Разрешенные к применению болты классов прочности с предварительным натяжением Allowed pre-tensioned bolts of strength classes	10,9, 12,9	8,8, 10,9
Возможность установки высокопрочных болтов в овальные отверстия The possibility of installing high- strength bolts in oval holes	Не допускается Not allowed	Да Yes
Способы обработки поверхностей трения Methods of preparation of friction surfaces	По табл. 42 СП 16.13330 According to Table 42 CP 16.13330	По табл. 3.7 EN 1993-1-8 (использование других способов обработки допускается только после проведения соответствующих испытаний по методикам из п. 1.2.4 EN 1993-1-8) According to Table 3.7 of EN 1993-1-8 (the use of other preparation methods is allowed only after carrying out the appropriate tests according to the methods from EN 1993-1-8)
Срез одной плоскости Single plane cut	По площади болта брутто A (резьба не должна проходить через плоскость среза) By bolt area gross A (the thread must not pass through the cutting plane)	По площади болта брутто A или нетто A_s (резьба может проходить через плоскость среза) By bolt area gross A or net A_s (the thread can pass through the cut plane)
Применение комбинированных соединений (высокопрочные болты и сварка) Application of combined joints (high- strength bolts and welding)	Нет No	Да (натяжение высокопрочных болтов производится после окончания выполнения сварочных работ) Yes (tension of high-strength bolts is made after the completion of welding work)

ствие пластического разрушения поперечного сечения пояса);

- отказ боковой поверхности пояса (или отказ стенки пояса) из-за раздавливания, пластификации или неустойчивого состояния (выгиб или потеря устойчивости боковой поверхности пояса из замкнутого профиля или стенки пояса) в месте примыкания сжатого стержня решетки;
- сдвиг (срез) сечения пояса;
- вырывание поверхности пояса (отказ из-за возникновения трещины, инициирующей отрыв стержня решетки от пояса);

- потеря местной устойчивости стержня решетки [24].

2. Имеется возможность расчета пространственных бесфасоночных узлов КК, ТТ и ХХ (рис. 5). Наиболее важный критерий — это уменьшение минимального угла наклона решетки к поясу до 30°. Из недостатков Еврокода следует отметить более жесткие требования к профилям и их химическому составу, в случае невыполнения которых сварка допускается только в зонах, расположенных на расстоянии $5t$ от углов сечения профиля (табл. 3). Также необходимо отметить, что в Еврокоде отсутствует

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 5, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 5, 2024

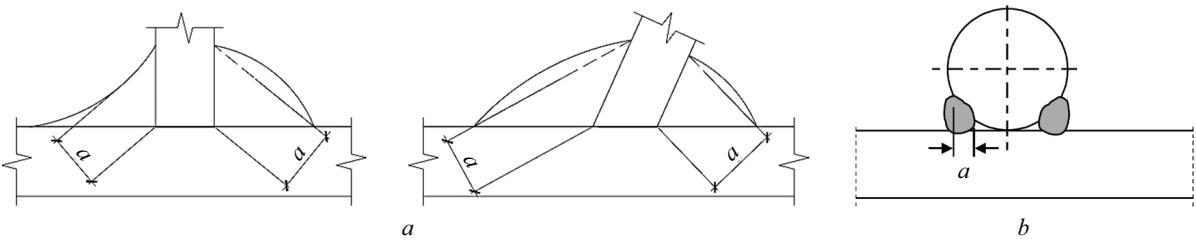


Рис. 3. К определению эффективной толщины углового сварного шва
Fig. 3. To determine the effective thickness of the fillet weld

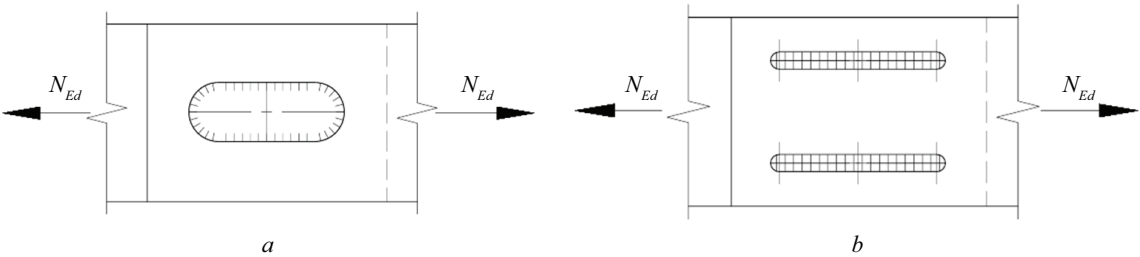
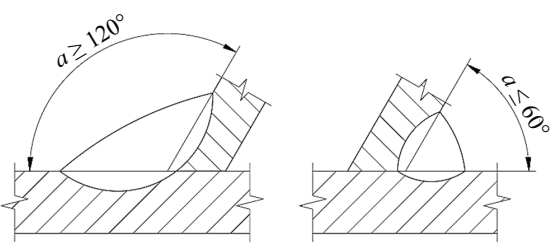


Рис. 4. Круговой шов с вытянутым отверстием (a) и пробочный (b)
Fig. 4. Circular weld with elongated hole (a) and plug weld (b)

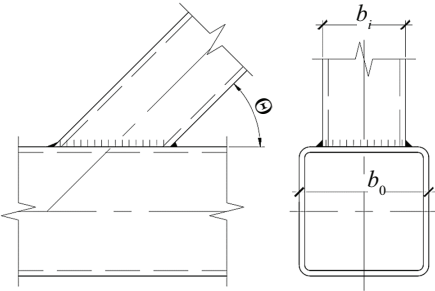
Табл. 2. Конструирование сварных соединений по СП 16.13330 и EN 1993-1-8
Table 2. Construction of welded joints according to CP 16.13330 and EN 1993-1-8

Параметр Parameter	СП 16.13330 SP 16.13330	EN 1993-1-8
Применение сварочных материалов по ГОСТ, ТУ и т.д. Application of materials according to GOST	Да Yes	Нет (только соответствующие ссылочным стандартам EN ISO) Not allowed (only in accordance with EN ISO standards)
Наличие классификации сварных соединений Classification of welded connections	Нет No	Да Yes
Возможность расчета и конструирования сварных швов Possibility of calculation and design of welds		
• угловые круговые швы (рис. 4, a) fillet circular weld (Fig. 4, a)	Нет No	Да Yes
• пробочные швы (рис. 4, b) plug weld (Fig. 4, b)	Нет No	Да Yes
• с клинообразным зазором (рис. 3, b) flare groove welds (Fig. 3, b)	Нет No	Да Yes
• угловые швы с углами наклона от 60 до 120° fillet weld with tilt angles from 60 to 120°	Нет No	Да Yes
• угловые швы с углами наклона до 60 и от 120° fillet weld with tilt angles up to 60 and from 120° 	Нет No	При углах менее 60° угловой сварной шов следует рассматривать как стыковой с неполным проваром. При углах более 120° несущую способность угловых сварных швов необходимо определять испытанием в соответствии с EN 1990 At angles of less than 60°, the fillet weld should be considered as a butt weld without full penetration. At angles of more than 120°, the bearing capacity of fillet welds should be determined by testing in accordance with EN 1990

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Параметр Parameter	СП 16.13330 SP 16.13330	EN 1993-1-8
Минимальная расчетная длина сварного шва Minimum design weld length	$4k_f$ 40 мм / mm	$6a$ 30 мм / mm
Расчетная длина сварного шва Design length of the weld	$l_w = l + 1$ см / cm	$l_{eff} = 1$ или $l_{eff} = 1 + 2a$ $l_{eff} = 1$ or $l_{eff} = 1 + 2a$
Максимальная длина сварного шва Maximum design weld length	Для фланговых швов $85\beta_f k_f$ For flank welds $85\beta_f k_f$	Только для нахлесточных соединений Only for overlapping connections

Табл. 3. Область применения бесфасоночных узлов из прямоугольных труб по СП 16.13330 и EN 1993-1-8 [24]
Table 3. Scope of application of fascia-free rectangular pipe joints according to CP 16.13330 and EN 1993-1-8 [24]

Параметр Parameter	СП 16.13330 CP 16.13330	EN 1993-1-8
Минимальная толщина стенки труб Minimum pipe wall thickness	3 мм / mm	2,5 мм / mm
Максимальная толщина стенки труб Maximum pipe wall thickness	—	25 мм / mm
Отношение ширины раскоса b_i к ширине пояса b_o The ratio of the width of the brace b_i to the width of the flange b_o 	$b_i/b_o \leq 0,9$	$b_i/b_o = 0,25-1,0$ (см. табл. 7.8 EN 1993-1-8) (see Table 7.8 EN 1993-1-8)
Допустимые углы наклона раскосов Θ , град Permissible slope angles of the struts Θ , deg	$\Theta \geq 38^\circ$	$\Theta \geq 30^\circ$
Сталь Steel	C245–C460	Стали с пределом текучести до 460 МПа Steel with yield strength of up to 460 MPa
Требования к профилям Profile Requirements	—	Должны соответствовать EN 10210 или EN 10219 Must comply with EN 10210 or EN 10219
Требования к химическому составу и раскислению стали труб Requirements for the chemical composition and deoxidation of steel pipes	—	$C = (0,09-0,15) \%$; $P \leq 0,04 \%$; $S \leq 0,05 \%$; $Al \geq 0,02 \%$
Дополнительные требования Additional requirements	—	Класс поперечного сечения 1 или 2 Cross section class 1 or 2
Типы плоских бесфасоночных узлов Types of planar fascia-free joints	K, КТ, N, T, Y (см. рис. 25 ²) (see Fig. 25 ²)	K, КТ, N, T, Y, X (см. рис. 7.1 EN 1993-1-8) (see Fig. 7.1 EN 1993-1-8)
Типы пространственных бесфасоночных узлов Types of spatial fascia-free joints	—	КК, ТТ и ХХ (рис. 5) KK, TT and XX (Fig. 5)

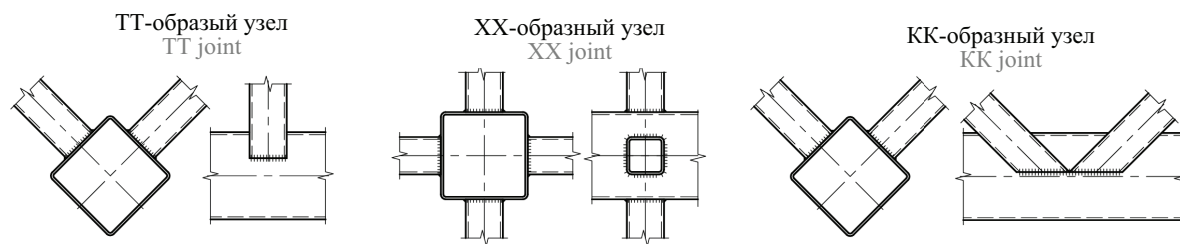


Рис. 5. Пространственные бесфасоночные узлы из прямоугольных труб по EN 1993-8

Fig. 5. Spatial joints of fascia-free rectangular pipes according to EN 1993-8

возможность расчета сварных швов, прикрепляющих стержни решетки к поясу, вследствие принятой гипотезы равнопрочности стыковых сварных швов основному металлу [23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного сопоставления строительных норм по проектированию стальных конструкций СП 16.13330 и EN 1993 можно сделать следующие выводы.

Методологические подходы к проверкам предельных состояний и обеспечению надежности стальных конструкций в СП 16.13330 и Еврокодах носят очень близкий характер, однако существуют различия в значениях и наборах частных коэффициентов. Наибольшее отличие в значениях частных коэффициентов обусловлено разными уровнями надежности, принятыми в СП и Еврокодах. При этом, по мнению авторов, набор частных коэффициентов, представленный в СП 16.13330, позволяет более достоверно учесть проектные условия. Так, доступен более детальный учет изменения прочностных характеристик стали от толщины проката и более полный набор в СП 16.13330 коэффициентов условий работы. Прямое сравнение значений коэффициентов надежности невозможно из разных моделей несущей способности. Также необходимо учитывать тот факт, что модели сопротивления, принятые в Еврокодах, ориентированы на предсказания 5%-ного

квантиля, в то время как модели, заложенные в СП, традиционно подгоняются по среднему значению.

Классификация поперечных сечений в EN 1993-1-1 разработана для европейского проката. При проектировании стальных конструкций по Еврокодам из сталей по ГОСТ 27772⁹ методы классификации поперечных сечений прокатных профилей, выпускаемых по ГОСТ или ТУ, нуждаются в корректировке.

Часть 1-8 EN 1993 предоставляет несколько больше возможностей при проектировании сварных и болтовых соединений: возможность проектирования срезных соединений по площади болта нетто; расчет угловых круговых, пробочных, с клинообразным зазором и угловых с различными углами наклона элементов.

При проектировании бесфасоночных узлов из прямоугольных труб Еврокод предоставляет больше возможностей: применение узлов с углами наклона решетки от 30°, больший диапазон отношений ширины раскоса к поясу, возможность конструирования пространственных узлов по типу КК, ТТ и ХХ. EN 1993-1-8 содержит больше схем разрушения бесфасоночных узлов, однако не по всем схемам приведен соответствующий расчет. Еврокод также накладывает более жесткие требования к гнутым профилям, их химическому составу и раскислению стали [24].

⁹ ГОСТ 27772–2021. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. 2021. 32 с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М. : Стройиздат, 1947. 95 с.
2. Балдин В.А., Гольденблат И.И., Коченов В.И., Пильдиш М.Я., Таль К.Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям. М. : Стройиздат, 1951. 272 с.
3. Novák L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures // Structural Concrete. 2022. Vol. 24. Issue 1. Pp. 771–787. DOI: 10.1002/suco.202200179

4. Балдин В.А., Урицкий М.Р. Обеспеченность нормативных и расчетных сопротивлений малоуглеродистой стали для строительных металлоконструкций // Промышленное строительство. 1978. № 6. С. 19–21. EDN ZIFGUP.
5. Бельский Г.Е. О предельных состояниях элементов металлических конструкций при сжатии (растяжении) с изгибом // Строительная механика и расчет сооружений. 1973. № 2. С. 51–57.
6. Allaix D.L., Carbone V.I., Mancini G. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures // Structural Concrete. 2013. Vol. 14. Issue 1. Pp. 29–42. DOI: 10.1002/suco.201200017

7. Sykora M., Holický M. Safety format for non-linear analysis in the model code — verification of reliability level // Proceeding of fib Symposium on Concrete Engineering for excellence and efficiency. 2011. Pp. 943–946.

8. Надольский В.В., Голицки М., Сикора М., Тур В.В. Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20. EDN QGRYLZ.

9. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 1 // Строительство и реконструкция. 2016. № 4 (66). С. 73–84. EDN WJFTB.

10. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear // Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2022. Vol. 36. Pp. 119–126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119

11. Prokop J., Odrobiňák J., Farbák M., Novotný V. Load-carrying capacity of bailey bridge in civil applications // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 8. P. 3788. DOI: 10.3390/app12083788

12. Holický M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load // The Art of Resisting Extreme Natural Forces. 2007. Vol. 58. DOI: 10.2495/en070061

13. Sýkora M., Holický M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load. Shanghai : Tongji University Press, 2009. Pp. 183–188.

14. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns // Architecture, Structures and Construction. 2022. Vol. 2. Issue 3. Pp. 365–380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5

15. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088

16. Konečný P., Horňáková M., Lehner P., Rovnanikova P., Sykora M. Model uncertainty in diffusion coefficient for chloride ingress into concrete // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 31. Pp. 147–153. 10.1016/j.prostr.2021.03.023

17. Holický M., Retief J.V., Sýkora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance // Probabilistic Engineering Mechanics. 2016. Vol. 45. Pp. 188–197. DOI: 10.1016/j.probengmech.2015.09.008

18. Shankar S., Kumar R., Khatri A.P., Gupta L.M. Comparison of section classification procedure of different codes // ASPS Conference Proceedings. 2022. Vol. 1. Issue 1. Pp. 443–447. DOI: 10.38208/acp.v1.533

19. Graciano-Gallego C.A., Loaiza N., Casanova E. A comparative analysis of resistance models for austenitic stainless steel girders subjected to concentrated loads // Revista UIS Ingenierías. 2021. Vol. 21. Issue 1. DOI: 10.18273/revuin.v21n1-2022008

20. Шурин А.Б., Туснин А.Р., Зинкевич И.В., Мухин А.В. Проектирование стальных конструкций в соответствии с требованиями EUROCODES. М. : Изд-во АСВ, 2021. 224 с.

21. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspart J.P. Classification and cross-section resistance of equal-leg rolled angle profiles // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 185. P. 106842. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106842

22. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspart J.P. Compression tests on large angle columns in high-strength steel // Steel Construction. 2022. Vol. 15. Issue 1. Pp. 43–47. DOI: 10.1002/stco.202100051

23. Шурин А.Б., Зинкевич И.В., Мухин А.В. Сравнительный анализ расчета и проектирования элементов стальных конструкций по ТКП EN 1993-1 и СНиП II-23 // Вестник БрГТУ. 2020. № 1. С. 23–27. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-23-27

24. Шурин А.Б., Мухин А.В. Опыт конструирования ферм из гнутосварных профилей в соответствии с требованиями EN 1993-1 // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини : збірник наукових праць. 2020. С. 141–149.

Поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 29 февраля 2024 г.

Об авторах: **Андрей Брониславович Шурин** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shuryn@mail.ru;

Виталий Валерьевич Надольский — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; доцент кафедры строительных конструкций; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskivv@mail.by.

Вклад авторов:

Шурин А.Б. — написание разделов «Классификация поперечных сечений», «Расчет и конструирование соединений», «Классификация и моделирование узлов», «Конструирование бесфасоночных узлов из прямоугольных труб», корректура раздела «Коэффициенты надежности», выводы.

Надольский В.В. — написание раздела «Коэффициенты надежности», корректировка разделов «Классификация поперечных сечений», «Классификация и моделирование узлов», выводы.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Streletsky N.S. *Fundamentals of statistical accounting of the safety factor of structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1947; 95. (rus.).
2. Baldin V.A., Goldenblat I.I., Kochenov V.I., Pildish M.Ya., Tal K.E. *Calculation of building structures based on limit states*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1951; 272. (rus.).
3. Novák L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures. *Structural Concrete*. 2022; 24(1):771-787. DOI: 10.1002/suco.202200179
4. Baldin V.A., Uritsky M.R. Provision of standard and calculated resistances of low-carbon steel for building metal structures. *Industrial Construction*. 1978; 6:19-21. EDN ZIFGUP. (rus.).
5. Belsky G.E. On the limit states of elements of metal structures under compression (tension) with bending. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1973; 2:51-57. (rus.).
6. Allaix D.L., Carbone V.I., Mancini G. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*. 2013; 14(1):29-42. DOI: 10.1002/suco.201200017
7. Sykora M., Holický M. Safety format for non-linear analysis in the model code — verification of reliability level. *Proceeding of fib Symposium on Concrete Engineering for Excellence and Efficiency*. 2011; 943-946.
8. Nadolski V.V., Holický M., Sykora M., Tur V.V. Comparison of Reliability Levels Provided by the Eurocodes and Standards of the Russian Federation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 6:7-20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20. EDN QGRYLZ. (rus.).
9. Tur V., Nadolski V. The partial factor values calibration for the ultimate limit state checking of steel structures for the conditions republic of Belarus. Part 1. *Building and Reconstruction*. 2016; 4(66):73-84. EDN WJFTB. (rus.).
10. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022; 36:119-126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119
11. Prokop J., Odrobiňák J., Farbák M., Novotný V. Load-carrying capacity of bailey bridge in civil applications. *Applied Sciences*. 2022; 12(8):3788. DOI: 10.3390/app12083788
12. Holický M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load. *The Art of Resisting Extreme Natural Forces*. 2007; 58. DOI: 10.2495/en070061
13. Sýkora M., Holický M. *Reliability-based design of roofs exposed to a snow load*. Shanghai, Tongji University Press, 2009; 183-188.
14. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns. *Architecture, Structures and Construction*. 2022; 2(3):365-380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5
15. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088
16. Konečný P., Hornáková M., Lehner P., Rovnanikova P., Sykora M. Model uncertainty in diffusion coefficient for chloride ingress into concrete. *Procedia Structural Integrity*. 2021; 31:147-153. 10.1016/j.prostr.2021.03.023
17. Holický M., Retief J.V., Sýkora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016; 45:188-197. DOI: 10.1016/j.probenmech.2015.09.008
18. Shankar S., Kumar R., Khatri A.P., Gupta L.M. Comparison of section classification procedure of different codes. *ASPS Conference Proceedings*. 2022; 1(1):443-447. DOI: 10.38208/acp.v1.533
19. Graciano-Gallego C.A., Loaiza N., Casanova E. A comparative analysis of resistance models for austenitic stainless steel girders subjected to concentrated loads. *Revista UIS Ingenierías*. 2021; 21(1). DOI: 10.18273/revuin.v21n1-2022008
20. Shurin A.B., Tusnin A.R., Zinkevich I.V., Mukhin A.V. *Design of Steel Structures in Accordance with EUROCODES Requirements*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 224. (rus.).
21. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspert J.P. Classification and cross-section resistance of equal-leg rolled angle profiles. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 185:106842. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106842
22. Bezas M.Z., Demonceau J.F., Vayas I., Jaspert J.P. Compression tests on large angle columns in high-strength steel. *Steel Construction*. 2022; 15(1):43-47. DOI: 10.1002/stco.202100051
23. Shurin A.B., Zinkevich I.V., Mukhin A.V. Comparative analysis of calculation and design of steel structure elements according to TKP EN 1993-1 and SNiP II-23. *Bulletin of BrSTU*. 2020; 1:23-27. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-23-27 (rus.).
24. Shurin A.B., Mukhin A.V. Experience in designing trusses from bent-welded profiles in accordance with the requirements of EN 1993-1. *Everyday structures from metal and wood: collection of scientific works*. 2020; 141-149. (rus.).

Received August 28, 2023.

Adopted in revised form on February 26, 2024.

Approved for publication on February 29, 2024.

B I O N O T E S: **Andrei B. Shurn** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shurn@mail.ru;

Vitali V. Nadolski — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; Associate Professor of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RSCI: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskivv@mail.by.

Contribution of the authors:

Andrei B. Shurn — writing the sections “Classification of cross sections”, “Calculation and design of connections”, “Classification and modeling of nodes”, “Design of faceless nodes from rectangular pipes”, correction of the section “Reliability coefficients”, conclusions.

Vitali V. Nadolski — writing the section “Reliability coefficients”, correcting the sections “Classification of cross sections”, “Classification and modeling of nodes”, conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Расчет фибробетонного блока в составе локально усиленных узлов ферм из гнутосварных профилей

Линур Рафаилович Гимранов, Ришат Габдулхаевич Гайнетдинов,
Ленар Равилевич Хайруллин, Абдурахман Пажвак

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведено аналитическое и численное исследование узлов ферм из гнутосварных профилей (ГСП) с локальным заполнением из фибробетона (ФБ). Выполнен анализ численного расчета фибробетонного элемента как балки на упругом основании в качестве локального усиления узлов ферм из ГСП под действием сосредоточенной нагрузки от примыкающего раскоса. Несущая способность узла с непосредственным примыканием раскосов к поясам ферм из ГСП практически полностью определяется геометрией и физико-механическими характеристиками элементов ферм.

Материалы и методы. Применяется метод исследования, основанный на численном моделировании локального усиления узла ФБ. Материалы для узлов: пояс раскоса узла — сталь марки С345 и С255, соответственно по ГОСТ 27772–2015 с расчетным сопротивлением 340 и 240 МПа, локальное заполнение — ФБ с модулем упругости не ниже 27 000 МПа и расчетным сопротивлением сжатию $R_b = 11,5$ МПа.

Результаты. Получены уравнения, на основе которых можно анализировать коэффициент податливости основания фибробетонного блока как балки на упругом основании. Разработаны уравнения, на основе которых можно проанализировать коэффициент относительной изгибной жесткости для установления коэффициента податливости основания блока, предложена методика расчета фибробетонного блока на основе теории балки на упругом основании.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что рассмотрены возможные подходы к определению разных методов расчета фибробетонного блока в составе усиленных узлов ферм из ГСП, что позволит снизить металлоемкость и деформативность. Результаты, полученные при численных исследованиях коэффициента податливости основания фибробетонного блока, а также с использованием программного пакета ANSYS показали, что они близки к результатам расчета коэффициента жесткости фибробетонного блока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численный анализ, узел, фибробетон, стальная ферма, усиление, гнутосварной профиль, несущая способность, компьютерное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гимранов Л.Р., Гайнетдинов Р.Г., Хайруллин Л.Р., Пажвак А. Расчет фибробетонного блока в составе локально усиленных узлов ферм из гнутосварных профилей // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 752–762. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.752-762

Автор, ответственный за переписку: Ришат Габдулхаевич Гайнетдинов, gajnetdinov@bk.ru.

Calculation of a fibre concrete block as a part of locally reinforced truss nodes made of square hollow sections

Linur R. Gimranov, Rishat G. Gainetdinov, Lenar R. Khairullin, Abdurahman Pazhwak
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Analytical and numerical study of truss nodes made of square hollow sections (SHS) with local fibre concrete filling is presented. The analysis of numerical calculation of a fibre concrete element as a beam on an elastic base as a local reinforcement of a truss node made of SHS under the action of the concentrated load from the adjacent strut is performed. The bearing capacity of a node with the direct adjacency of struts to the chords of trusses made of S+HS is almost completely determined by geometry and physical and mechanical characteristics of truss elements made of SHS. With the cross-section of the elements selected on the basis of the calculation of the bars, the load-bearing capacity of K-type connections may not be ensured. In this case it is possible to change the dimensions of the cross-section of a truss node made of square hollow sections. In the existing Russian normative documents, there is no data on the calculation and design of reinforcement of truss nodes made of square hollow sections by filling with concrete. In this connection, it is important to develop simple and reliable methods of strengthening such nodes, as well as appropriate methods of their calculation. The purpose of the work is to develop a methodology for calculating the fibre concrete block of analytical dependencies to determine the bearing capacity under concentrated load.

Materials and methods. The research method based on the numerical modelling of local reinforcement of the node with fibre concrete is used. Materials for the nodes: chord and struts of the node — steel of S255 grade according to GOST 27772–2015 with design resistance 240 MPa, local filling — fibre concrete with elastic modulus not lower than 27,000 MPa and design resistance to compression $R_b = 11.5$ MPa.

Results. The main results of the work consist in the analytical study of truss nodes made of square hollow sections locally reinforced with fibre concrete block, the development of a method for calculating the fibre concrete block as a beam on an elastic base based on the results of numerical experiments in the software package ANSYS.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry consists in the fact that the possible approaches to the definition of different methods of calculation of fibre concrete block as a part of reinforced nodes of trusses made of square hollow sections were considered in order to reduce metal consumption and deformability. The results obtained in numerical studies of the base stiffness factor of fibre concrete block and the results obtained using the software package ANSYS showed that they are close to the results of calculating the stiffness factor of fibre concrete block in locally reinforced nodes of trusses made of square hollow sections reliably.

KEYWORDS: numerical analysis, node, fibre concrete, steel truss, reinforcement, square hollow section, bearing capacity, computer modelling

FOR CITATION: Gimranov L.R., Gainetdinov R.G., Khairullin L.R., Pazhwak A. Calculation of a fibre concrete block as a part of locally reinforced truss nodes made of square hollow sections. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):752-762. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.752-762 (rus.).

Corresponding author: Rishat G. Gainetdinov, gainetdinov@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стальные фермы из гнутосварных профилей (ГСП) получили широкое распространение в разных областях строительства: особенно в несущих покрытиях и перекрытиях промышленных, гражданских зданий. Соединения раскосов и стоек ферм из ГСП в узлах осуществляют путем непосредственного примыкания одних элементов к другим или с помощью узловых фасонков. К их достоинствам относятся экономичность, технологичность монтажа, отсутствие фасонков и наибольший радиус инерции за счет замкнутых сечений. При этом имеются недостатки узлов, например, К-образный тип соединения, в котором раскосы крепятся непосредственно к поясному элементу ферм из ГСП, имеет характерную картину разрушения в виде местного смятия стенки или полки пояса под действием сжимающей силы раскосных элементов. В этом случае изменить размеры сечения элементов узла не представляется возможным вследствие экономической целесообразности. В связи с этим важно разработать простые и надежные методы усиления данных узлов, а также соответствующие методики их расчета.

В данной работе рассматривается методика расчета фибробетонного блока как балки на упругом основании в составе узла ферм из ГСП. Узлы ферм из ГСП усиливаются путем заполнения фибробетоном (ФБ), чтобы значительно увеличить их несущую способность и жесткость [1]. Численные исследования и расчеты, основанные на характеристиках свойств фибробетонного блока, позволяют более экономично проектировать и применять для расчета конструкции на всех этапах работ узлов ферм из ГСП [2].

Элементы раскосов при растяжении и сжатии следует рассчитывать отдельно, определяющим предельным состоянием для растянутого элемента раскоса является преждевременная местная текучесть пояса в месте примыкания элементов раскоса или пробивной сдвиг поверхности пояса вокруг раскоса, что требует усиления [3–5]. Исследования

[2, 6–10] показали значительное увеличение несущей способности К-образных типов соединений с поясом, заполненных бетоном. Экспериментально изучены малые пролеты ферм из ГСП [11–13], где усиления К-образного типа соединений могут быть выполнены путем заполнения бетоном по всей длине пояса для повышения несущей способности элемента, а также огнестойкости. В публикациях [14–17] представлены результаты исследований для ферм пролетом более 12 м с локальным усилением, в частности, вблизи критических соединений. Авторы трудов [15–17] объясняют, что жесткость примыкания элементов раскоса зависит от усиленных поясов ферм бетоном и геометрических параметров, т.е. ширины примыкания элементов, конструктивной увязки узла. Необходимость разработки методики расчета усиленных узлов путем внутреннего заполнения стального сечения бетоном отмечается в работах [18–22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — стальные фермы из ГСП, локальное усиление узлов которых проводится монолитным ФБ. Предмет исследования — усиление узлов К-образного типа, выполненное согласно труду [10], а также расчет фибробетонного блока на действие сосредоточенной нагрузки от элементов раскоса. Определение действующих усилий в фибробетонном блоке аналитическими методами — комплексная задача, поскольку характер его граничных условий внутри пояса неясный. Авторами настоящей статьи предположено, что определяющим прочностью усилением внутри фибробетонного блока служит изгибающий момент, однако установление характера его распределения в расчетной модели из объемных конечных элементов (КЭ) не представляется возможным. По этой причине в расчетную модель по центру тяжести фибробетонного блока вводится стержневой элемент, жестко связанный с объемными КЭ, что позволит экстраполировать через приведенную жесткость изгибающие усилия в стержне на фибробетонный блок.

Рассматривается соединение узла фермы из ГСП К-образного типа с усиленным фибробетонным блоком (рис. 1). Блок сечением 110×110 мм, длиной 450 мм, выполнен из ФБ с модулем упругости $E = 30\,000$ МПа и расчетным сопротивлением на сжатие $R_b = 14,5$ МПа. Размеры участков раскосов и пояса приняты исходя из расчетных предпосылок распределения усилий, соответствующих в приопорном узле, а также в соответствии с практикой проведения экспериментов по испытанию узлов из ГСП [11]. Поперечное сечение пояса фермы $120 \times 120 \times 4$ мм и сжатого раскоса $60 \times 60 \times 3$ мм, растянутого $40 \times 40 \times 3$ мм. Стержень диаметром 20 мм. Материалы для узлов ферм: пояс выполнен из стали С345, раскосы из стали С255, соответственно по ГОСТ 27772–2015 [9] с расчетным сопротивлением 340 и 240 МПа.

Моделирование узлов ферм из ГСП К-образного типа, локально усиленного ФБ, представлено на рис. 1 [10]. Разработана конечно-элементная модель (КЭМ) в ПК ANSYS Workbench, включающая фрагменты раскосов и пояса, при этом граничные условия накладываются так, что при приложении усилия сжатия к одному из раскосов усилия распределяются аналогично приопорному узлу стропильной фермы из ГСП профилей. Граничные условия наложены следующим образом — растянутый раскос закреплен шарнирно, один конец фрагмента пояса закреплен шарнирно, другой раскреплен из плоскости. В расчетной модели присутствуют пластины заглушки, чтобы избежать краевых деформаций стенок ГСП, а также анкерный элемент соединения профиля ГСП с фибробетонным блоком из фрагмента трубы для предотвращения смещения блока внутри пояса. Торцевые пластины заглушки имеют толщину от 2 до 3 толщин стенок раскосов и пояса. Это позволяет снизить деформации при передаче продольных усилий на раскос и раскреплении от граничных условий и не создавать условий достижения предельных состояний раньше, чем оно будет достигнуто на рассматриваемом участке примыкания раскосов к поясу. В реальном узле в составе фермы этой проблемы не стоит, так как элемент пояса и раскоса протяженные. Передача усилия от растянутого раскоса к профилю осуществляется через сварной шов крепления раскоса к стенке профиля пояса, однако при этом стенка профиля деформируется и между фибробетонным блоком и стенкой профиля пояса образуется зазор. Деформации боковых стенок и нижней полки профиля пояса, в свою очередь, ограничены фибробетонным блоком, расположенным внутри него, который при этом работает по сложной деформированной схеме в замкнутом пространстве. Все тела в расчетной модели выполняются из объемных КЭ тетраэдральной формы.

Расчет модели осуществлялся в геометрически и физически нелинейной постановке с диаграммой работы стали по Прандтлю с пределом текучести 345 МПа и тангенциальным модулем, равным

0 МПа. Передача усилий от ГСП к блоку проводится через контактные элементы с коэффициентом трения, принятым равным 0,15. Напряженно-деформированное состояние (НДС) узла показано на рис. 2.

Эпюра распределения изгибающих моментов (рис. 3) получается по результатам численного моделирования узла, в котором по центру тяжести фибробетонного блока расположен стержневой элемент, жестко сочлененный с объемными КЭ фибробетонного блока, где в результате сложного НДС контактная передача усилий и образование зазоров (рис. 2, с) соответствуют эпюре на рис. 3.

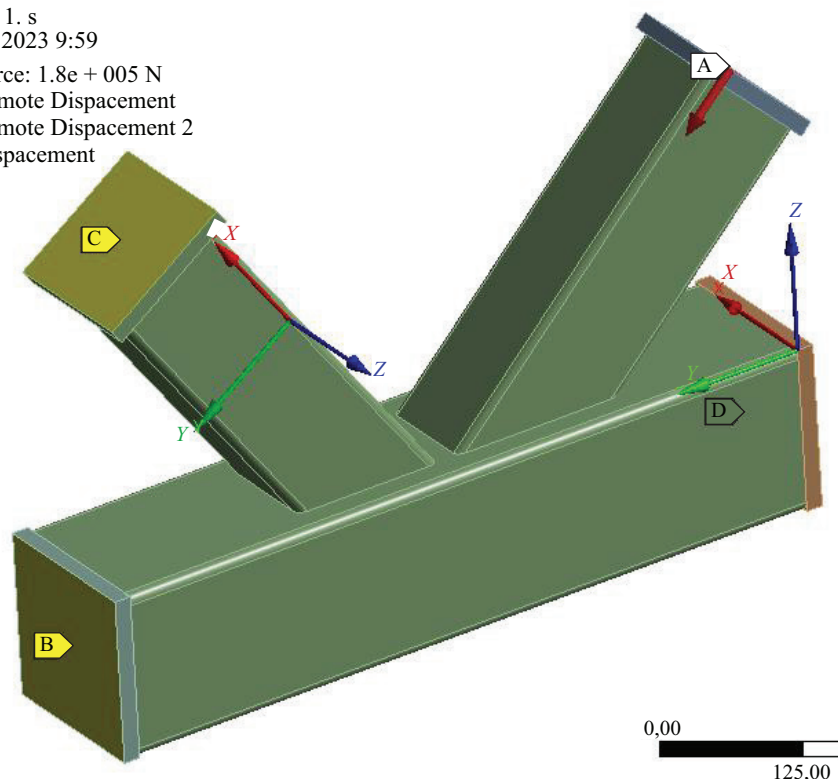
На рис. 3 видно, что для анализа работы фибробетонного блока в качестве усиленных узлов ферм из ГСП К-образного типа [8] можно применить аналогию балки на упругом основании (рис. 4). При этом предположение, что усилие от растянутого раскоса передается через анкер обусловлено эпюрой распределения изгибающих моментов на рис. 2, с, где пик расположен в створе анкера. Однако расположение этого пика возможно просто обусловлено центром пересечения осей раскосов.

По результатам численного моделирования с учетом нескольких сосредоточенных сил составили эпюру изгибающего момента (рис. 5, 6). Данные значения требуются для разработки методики расчета коэффициента податливости основания фибробетонного блока как балки на упругом основании [4]. На рис. 3 видно, что при воздействии на раскос сжимающих продольных сил на полку поясов ферм из ГСП, к которому раскос примыкает, главными являются напряжения изгиба. В случае заполнения пояса ФБ часть усилий от раскоса передается на фибробетонный блок, верхняя полка пояса разгружается. В этом случае работу этих блоков можно рассматривать как работу балки на упругом основании [5]. При этом гипотеза о расчете блока как балки на упругом основании не может воспроизвести эпюру моментов в точности, как в стержне, а только получить пиковые значения, которые нам и нужны. Полная точность эпюры не требуется, так как мы не смотрим деформации блока.

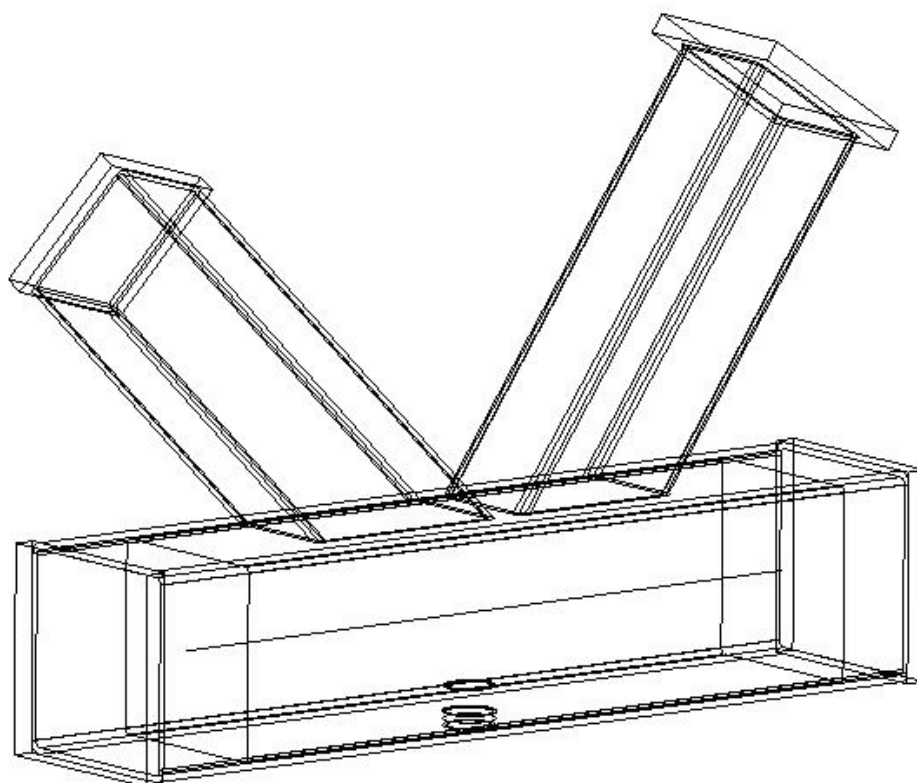
Аналитический подход расчета заключается в том, что в численных моделях, определяя моменты в стержне с разными значениями (β — соотношение ширины сжатого раскоса к ширине пояса и γ — соотношение половины ширины пояса к его толщине), находим значение моментов в балке на упругом основании, варьируя β^* — относительная изгибная жесткость. Таким образом, данный подход позволяет добиться того, что можно определить моменты в фибробетонном блоке, не создавая модель узла. Нахождение коэффициента относительной изгибной жесткости β^* фибробетонного блока на упругом основании в составе усиленных узлов ферм с учетом изгибающих моментов и сосредоточенных нагрузок представлено в работах [5, 11, 12].

Force
Time: 1. s
28.12.2023 9:59

A Force: 1.8e + 005 N
B Remote Displacement
C Remote Displacement 2
D Displacement



a



b

Рис. 1. Модель К-образного узла: *a* — граничные условия; *b* — стержневой элемент по центру фибробетонного блока
Fig. 1. Model of the K-node: *a* — boundary conditions; *b* — rod element in the centre of the fibre concrete block

Производилось варьирование параметров узла с определением изгибающего момента в стержне, расположенном в центре тяжести фибробетонного блока. После чего устанавливались параметры

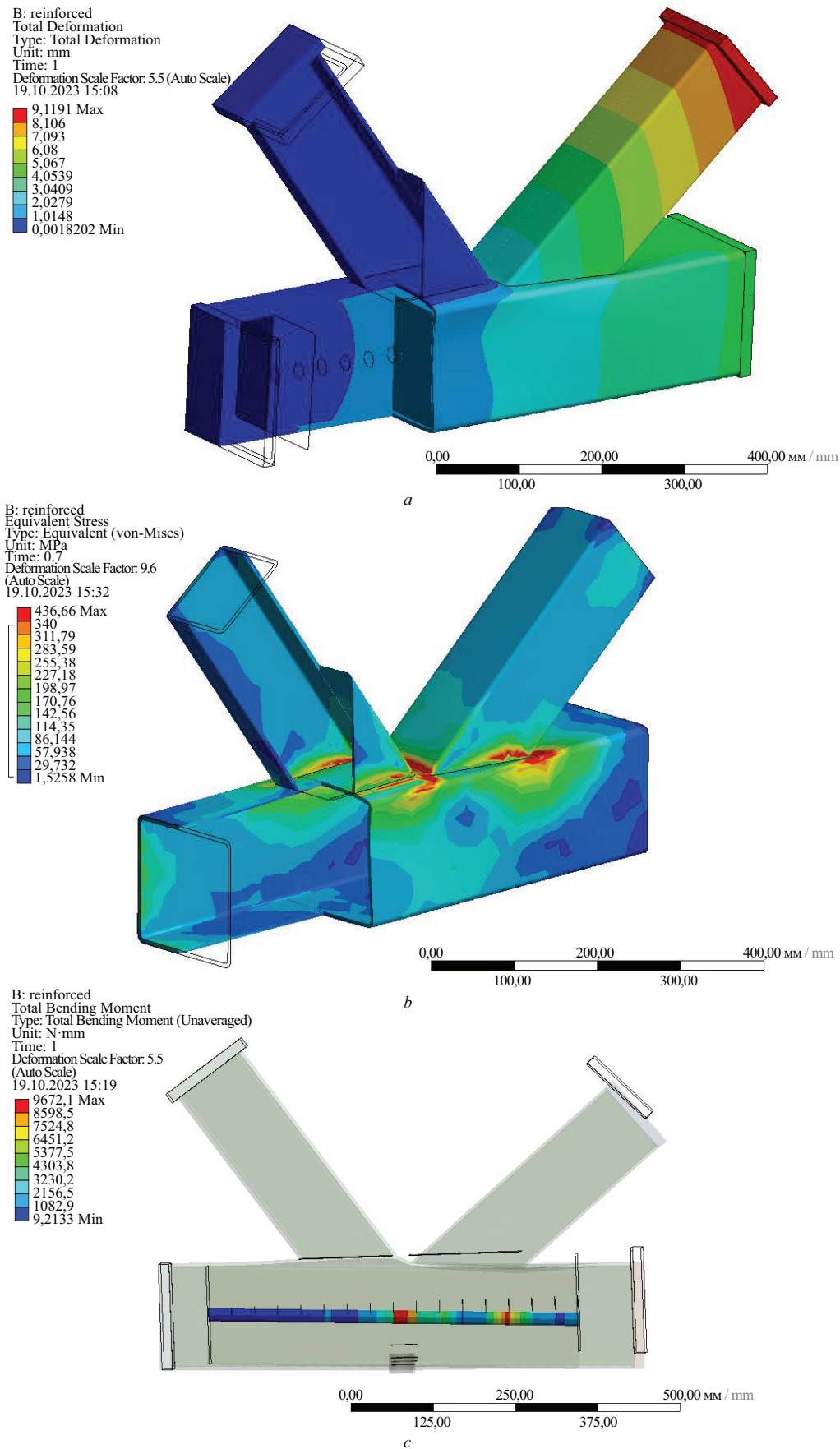


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние узла: *a* — деформации; *b* — приведенные напряжения; *c* — распределение изгибающих моментов в стержне

Fig. 2. Stress-strain state of a node: *a* — deformation; *b* — reduced tensions; *c* — distribution of bending moments in the rod

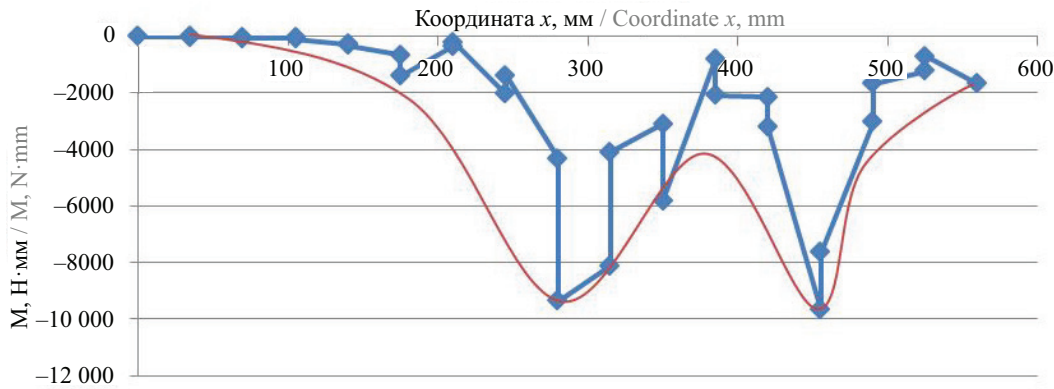


Рис. 3. Распределение изгибающих моментов в стержне: красным цветом обозначена огибающая эпюра моментов; синим — значения моментов в конечном элементе

Fig. 3. Distribution of bending moments in a rod: red — envelope diagram of moments; blue — values of moments in the finite element

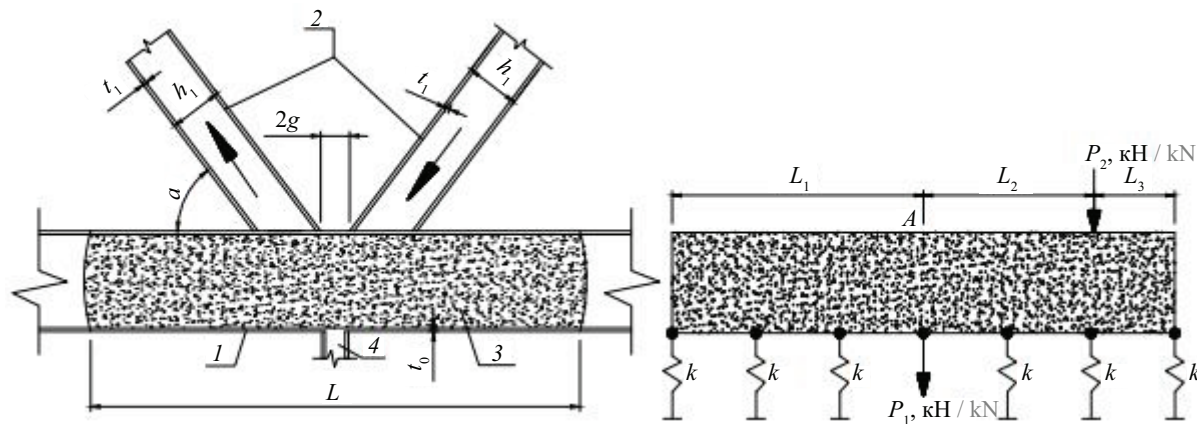


Рис. 4. Расчетная схема фибробетонного блока в составе узла фермы из ГСП: L_1 — расстояние от края блока до анкерного элемента из фрагмента трубы; L_2 — расстояние от анкерного элемента из фрагмента трубы до центра растянутого раскоса; L_3 — расстояние от центра растянутого раскоса до края блока; 1 — пояс; 2 — раскосы; 3 — фибробетонный блок; 4 — анкер

Fig. 4. Calculation scheme of the fibre concrete block as part of a truss nodes: L_1 — distance from the edge of the block to the anchor element from a pipe fragment; L_2 — distance from the anchor element from a pipe fragment to the center of the stretched strut; L_3 — distance from the center of the stretched strut to the edge of the block; 1 — belt; 2 — struts; 3 — fibre-reinforced concrete block; 4 — anchor

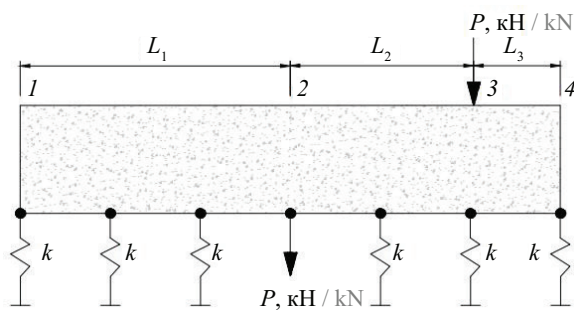


Рис. 5. Фибробетонный блок как балка на упругом основании

Fig. 5. Fibre concrete block as a beam on an elastic base

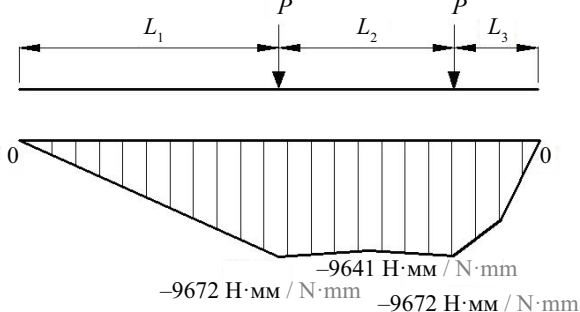


Рис. 6. Эпюры изгибающих моментов в фибробетонном блоке M , Н·мм

Fig. 6. Bending moment diagrams of the fibre concrete block M , N·mm

для определения коэффициента относительной изгибной жесткости β^* для расчета по аналогии балки на упругом основании:

$$M = \frac{P}{4\beta} \cdot e^{\beta \cdot x} (\cos \beta \cdot x - \sin \beta \cdot x). \tag{1}$$

Исходя из формулы (1) вычисляем коэффициент относительной изгибной жесткости: где M — изгибающий момент; P — сосредоточенная нагрузка.

Значение момента в блоке определяется путем численного исследования нахождения момента в стержне.

Для установления коэффициента податливости основания фибробетонного блока в составе усиленных узлов ферм из ГСП с учетом жесткости и коэффициента β^* относительной изгибной жесткости блока [5] используем формулу:

$$K = 4EI\beta^{*4}. \tag{2}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитические расчеты и моделирование проводились в соответствии с работой [3]. Для анализа фибробетонного блока в качестве усиленных узлов ферм из ГСП К-образных типов соединений в расчетных сечениях использованы методы расчета балки на упругом основании с учетом принципа независимости действия сил [6]. В расчетных схемах 1–5 варьировались параметры β и γ , которые отражают изменение соотношения ширины раскоса к ширине пояса и отношение ширины пояса к толщине стенки профиля, из которого он выполнен. Для каждой схемы 1–5 фиксировался изгибающий момент в стержне, проходящий внутри блока. Для каждой расчетной схемы подбирались такие расчетные значения жесткости балки на упругом основании K и β , чтобы аналитически вычисленный момент совпадал с приведенным моментом в блоке (моментом, определяемым умножением момента в стержне на соотношение момента инерции блока к моменту инер-

Результаты аналитических расчетов фибробетонного блока на упругом основании

Results of analytical calculations of fibre concrete block on an elastic base

Номер Number	P , кН / kN	M , кН·м / kN·m	β	2γ	K , кН/м / kN/m	β^* , м ⁻¹ / m ⁻¹
1	147	31,534	0,533	37,5	8562	1,1654
2	147	30,011	0,666	30	10 492	1,7278
3	147	26,414	0,800	25	16 362	2,9104
4	147	23,953	0,933	21,241	25 515	11,8624
5	147	21,983	1,000	18,751	27 175	12,6717

Примечание: $P = 147$ кН — усилие, которое вызывает предельное состояние в растянутом раскосе; β — соотношение ширины сжатого раскоса к ширине пояса; γ — соотношение половины ширины пояса к его толщине; K — коэффициент податливости основания фибробетонного блока; β^* — относительная изгибная жесткость.
Note: $P = 147$ kN — the force that causes the limit state in the tensile strut; β — the ratio of the width of the compressed strut to the width of the chord; γ — the ratio of half the width of the chord to its thickness; K — the coefficient of pliability of the fibre concrete block base; β^* — relative bending stiffness.

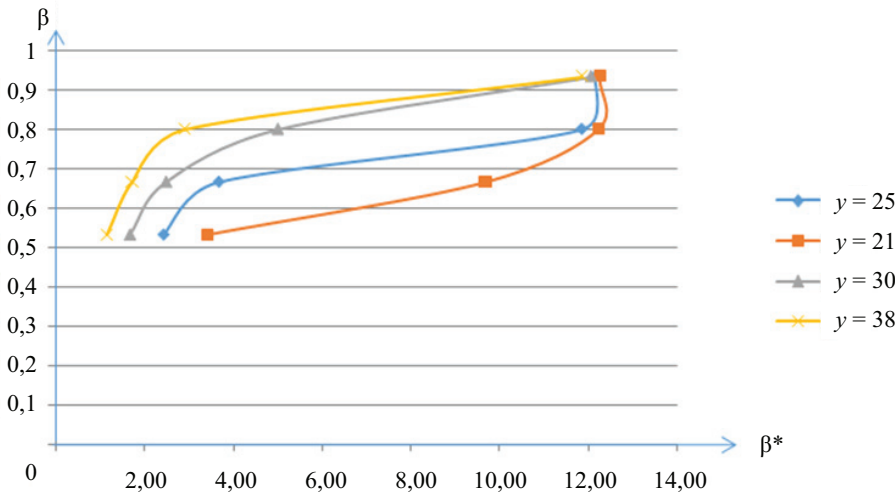


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента изгибной жесткости β^* и ширины сечения раскоса к ширине пояса
Fig. 7. Graphs of depending of bending stiffness coefficient β^* and strut cross-section width to the chord width

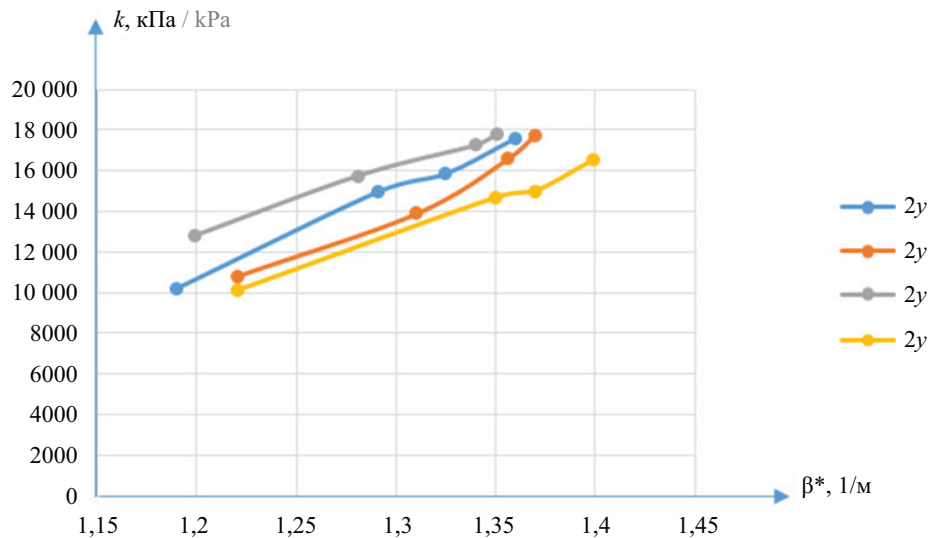


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента податливости от коэффициента изгибной относительной жесткости β^*

Fig. 8. Graphs of dependence of the coefficient of ductility of the base k on the coefficient of bending relative stiffness β^*

ции стержня). Полученные результаты расчетов коэффициента податливости, изгибающего момента и коэффициента изгибной жесткости представлены в таблице.

Значения моментов в таблице отличаются от моментов на рис. 3 по причине того, что это моменты в стержне и в блоке, которые в свою очередь пропорциональны их изгибным жесткостям. В данной статье не сравнивается момент, полученный в расчетной модели, с моментом, полученным аналитически. Численные расчеты фибробетонных блоков, моделирующие работу балки как на упругом основании, выполнены с использованием ПК ANSYS Workbench. По результатам численных исследований фибробетонного блока составлен график зависимости ширины сечения раскоса к ширине сечения пояса и коэффициента изгибной жесткости β^* (рис. 7).

По данному графику видно, что несущая способность узла фермы зависит от ширины сечения раскоса. С увеличением ширины сечения раскоса деформативность уменьшается, несущая способность увеличивается. Исходя из результатов численных расчетов фибробетонного блока как балки на упругом основании составлены графики зависимости коэффициента податливости основания от коэффициента изгибной жесткости β^* блока (рис. 8).

По данному графику видно, что промежуточные значения несущей способности при ширине сечения раскоса 80 мм отличаются от ширины сечения 120 мм. Таким образом, несущая способность узла при ширине сечения раскоса 120 мм превышает на 40 % по сравнению с шириной сечения 80 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Определена расчетная схема модели узла, отражающая несущую способность в составе расчетной модели узла из ГСП, включающего раскосы и пояса фермы. Установлена применимость балочной аналогии к расчетной схеме фибробетонного блока как балки на упругом основании.

Получены различные значения β^* в зависимости от параметров узла β , γ и коэффициента податливости основания фибробетонного блока K в зависимости от β^* .

Получены уравнения, на основе которых можно анализировать коэффициент податливости основания фибробетонного блока как балки на упругом основании, а также уравнения, на основе которых можно вычислить изгибающий момент фибробетонного блока с учетом теории балки на упругом основании. Разработаны уравнения, на основе которых можно проанализировать коэффициент относительной изгибной жесткости для определения коэффициента податливости основания блока.

Разработана методика расчета фибробетонного блока на основе теории балки на упругом основании, имеющая важное значение для строительной отрасли.

Несмотря на отсутствие полноценной нормативно-технической базы по методикам расчета фибробетонного блока как балки на упругом основании в качестве усиленных узлов ферм из ГСП, разработанная в ПК ANSYS Workbench КЭМ блока позволяет достоверно определять изгибающий момент. Исходя из него, возможно найти коэффициент податливости K и коэффициент относительной изгибной жесткости β^* блока.

Далее следует выполнить экспериментальное исследование для внедрения методики в строительное.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент RU № 2793503. Способ усиления узла верхнего пояса решетчатой конструкции из трубчатых профилей / Гимранов Л.Р., Гайнетдинов Р.Г., Пажвак А.; заявл. № 2022129975 от 18.11.2022. Бюл. № 10.
2. Зинькова В.А. Методика экспериментальных исследований узловых соединений трубчатых элементов фермы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 50–51. EDN OPGHQL.
3. Gimranov L., Kuznetsov I. Locally concrete filled reinforced joints of RHS and SHS trusses // Proceedings of STCCE. 2021. Pp. 58–71. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_7
4. Xu W., Han L., Tao Z. Flexural behaviour of curved concrete filled steel tubular trusses // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 93. Pp. 119–134. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.10.015
5. Hou C., Han L.-H., Zhao X.-L. Behaviour of circular concrete filled double skin tubes subjected to local bearing force // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 93. Pp. 36–53. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.004
6. Гимранов Л.Р., Пажвак А. К определению напряженно-деформированного состояния бетонного блока в составе усиленного узла фермы из гнуто-сварных профилей // Известия КГАСУ. 2022. № 4 (62). С. 51–60. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_51. EDN LGZNAO.
7. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Труль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М. : Стройиздат, 1974. 145 с.
8. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Гайнетдинов Р.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния болтового узла соединения из холодногнутых тонкостенных профилей // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 7. С. 831–843. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843
9. Казакова Е.В. Анализ напряженно-деформированного состояния бесфасоночных узлов легких ферм // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2019. № 53. С. 36–40. EDN JXVGBP.
10. Sakai Y., Hosaka T., Ioe A., Ichikawa A., Mitsuki K. Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder // Journal of Constructional Steel Research. 2004. Vol. 60. Issue 3–5. Pp. 683–699. DOI: 10.1016/s0143-974x(03)00136-6
11. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.L., Vegte G.J., Kurobane Y. Design guide for Rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading // CIDECT. 2009.
12. Gimranov L.R., Pazhwak A. To the determination of the stress-strain state of a concrete block as part of a reinforced node truss from square hollow sections // International Journal of Advanced Academic Studies. 2022. Vol. 4. Pp. 135–139.
13. Nawrot J. An analytical and numerical assessment of the load capacity of the K-joint of flat steel trusses // Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo. 2020. Vol. 175. Issue 25. Pp. 168–173. DOI: 10.17512/znb.2019.1.26
14. Mazon A.A., Sarmanho A., Nunes G., Roquete L., Neiva L.H., Souza F. Numerical analysis of truss systems with stiffened flattened end-bars // Latin American Journal of Solids and Structures. 2018. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1590/1679-78254119
15. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 870. Issue 1. P. 012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098
16. Huang W., Lai Z., Chen B., Yao P. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders // Engineering Structures. 2017. Vol. 152. Pp. 607–618. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.035
17. Jin D., Hou C., Shen L., Han L.H. Numerical investigation of demountable CFST K-joints using blind bolts // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 160. Pp. 428–443. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.05.046
18. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 870. Issue 1. P. 012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098
19. Han L.H., Xu W., He S.H., Tao Z. Flexural behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) chord to hollow tubular brace truss: experiments // Journal of Constructional Steel Research. 2015. Vol. 109. Pp. 137–151. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.002
20. Yang W., Yan R., Suo Y., Zhang G., Huang B. Experimental study on hysteretic behavior of the overlapped k-joints with concrete filled in chord // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Issue 7. P. 1456. DOI: 10.3390/app9071456
21. Feng R., Chen Y., Gao S., Zhang W. Numerical investigation of concrete-filled multi-planar CHS Inverse-Triangular tubular truss // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 94. Pp. 23–37. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.030
22. Chen Y., Feng R., Gao S. Experimental study of concrete-filled multiplanar circular hollow section tubular trusses // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 94. Pp. 199–213. DOI: 10.1016/j.tws.2015.04.013

Поступила в редакцию 20 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 9 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Линур Рафаилович Гимранов** — кандидат технических наук, доцент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 745548, Scopus: 57210968788, ORCID: 0000-0003-1728-1825; leenuur@gmail.com;

Ришат Габдулхаевич Гайнетдинов — кандидат технических наук, ассистент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 1111543; rishat.gajnetdinov@bk.ru;

Ленар Равилевич Хайруллин — кандидат технических наук, доцент, **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; SPIN-код: 3307-4692, Scopus: 57188837651, ORCID: 0000-0002-2870-4195; lenarhay@mail.ru;

Абдурахман Пажвак — аспирант; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; pazhwak_2008@yahoo.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Patent RU No. 279350304. *Method for strengthening upper chord node of a lattice structure made of tubular profiles* / Gimranov L.R., Gainetdinov R.G., Pazhwak A.; appl. No. 2022129975 18.11.2022. Bul. No. 10.
2. Zinkova V.A. Methodology of experimental research of nodal joints of tubular truss elements. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012; 1:50-51. EDN OPGHQL. (rus.).
3. Gimranov L., Kuznetsov I. Locally concrete filled reinforced joints of RHS and SHS trusses. *Proceedings of STCCE*. 2021; 58-71. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_7
4. Xu W., Han L., Tao Z. Flexural behaviour of curved concrete filled steel tubular trusses. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 93:119-134. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.10.015
5. Hou C., Han L.-H., Zhao X.-L. Behaviour of circular concrete filled double skin tubes subjected to local bearing force. *Thin-Walled Structures*. 2015; 93:36-53. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.004
6. Gimranov L.R., Pazhwak A. Determination of the stress-strain state of a concrete block as part of a reinforced node truss from square hollow sections. *News Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 4(62):51-60. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_51. EDN LGZNAO. (rus.).
7. Kikin A.I., Sanzharovsky R.S., Trull V.A. *Structures from steel pipes filled with concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974; 145. (rus.).
8. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A., Gainetdinov R.G. Investigation of the stress-deformation state of a bolt-joint assembly of cold-bent thin-walled profiles. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):831-843. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.831-843 (rus.).
9. Kazakova E.V. Analysis of the stress-deformation state of the facetless units of light farms. *Collection of Scientific Papers of the Pre-University*. 2019; 53:36-40. EDN JXVGBP. (rus.).
10. Sakai Y., Hosaka T., Isoe A., Ichikawa A., Mitsuki K. Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004; 60(3-5):683-699. DOI: 10.1016/s0143-974x(03)00136-6
11. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.L., Vegte G.J., Kurobane Y. Design guide for Rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. *CIDECT*. 2009.
12. Gimranov L.R., Pazhwak A. To the determination of the stress-strain state of a concrete block as part of a reinforced node truss from square hollow sections. *International Journal of Advanced Academic Studies*. 2022; 4:135-139.
13. Nawrot J. An analytical and numerical assessment of the load capacity of the K-joint of flat steel trusses. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*. 2020; 175(25):168-173. DOI: 10.17512/znb.2019.1.26
14. Mazon A.A., Sarmanho A., Nunes G., Roquete L., Neiva L.H., Souza F. Numerical analysis of truss systems with stiffened flattened end-bars. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2018; 15(3). DOI: 10.1590/1679-78254119
15. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 870(1):012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098
16. Huang W., Lai Z., Chen B., Yao P. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders. *Engineering Structures*. 2017; 152:607-618. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.035
17. Jin D., Hou C., Shen L., Han L.H. Numerical investigation of demountable CFST K-joints using blind bolts. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 160:428-443. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.05.046
18. Thejeel M.M., Shallal M.A. Performance of concrete-filled steel tube truss girders strength by adding reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 870(1):012098. DOI: 10.1088/1757-899x/870/1/012098

19. Han L.H., Xu W., He S.H., Tao Z. Flexural behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) chord to hollow tubular brace truss: experiments. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 109:137-151. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.002

20. Yang W., Yan R., Suo Y., Zhang G., Huang B. Experimental Study on Hysteretic Behavior of the Overlapped K-joints with Concrete Filled in Chord. *Applied Sciences*. 2019; 9(7):1456. DOI: 10.3390/app9071456

21. Feng R., Chen Y., Gao S., Zhang W. Numerical investigation of concrete-filled multi-planar CHS Inverse-Triangular tubular truss. *Thin-Walled Structures*. 2015; 94:23-37. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.030

22. Chen Y., Feng R., Gao S. Experimental study of concrete-filled multiplanar circular hollow section tubular trusses. *Thin-Walled Structures*. 2015; 94:199-213. DOI: 10.1016/j.tws.2015.04.013

Received October 20, 2023.

Adopted in revised form on February 8, 2024.

Approved for publication on February 9, 2024.

B I O N O T E S : **Linur R. Gimranov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 745548, Scopus: 57210968788, ORCID: 0000-0003-1728-1825; leenuur@gmail.com;

Rishat G. Gainetdinov — Candidate of Technical Sciences, assistant; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 1111543; rishat.gajnetdinov@bk.ru;

Lenar R. Khairullin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; SPIN-code: 3307-4692, Scopus: 57188837651, ORCID: 0000-0002-2870-4195; lenarhay@mail.ru;

Abdurahman Pazhwak — postgraduate student; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; pazhwak_2008@yahoo.com.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777

Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности

Владимир Филиппович Мущанов, Анатолий Николаевич Оржиховский,
Александр Владимирович Мущанов, Максим Николаевич Цепляев
*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА);
г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Пространственные стержневые металлические конструкции высокого уровня ответственности являются одними из наиболее часто используемых в качестве конструктивных систем для перекрытия больших пролетов зданий и сооружений. Однако в данных системах при неблагоприятном сочетании факторов может активно развиваться прогрессирующее разрушение. Цель исследования — разработка научного обоснования новых подходов к проектированию устойчивых к развитию прогрессирующего обрушения оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности с гарантированными уровнями надежности ключевых и второстепенных элементов.

Материалы и методы. Применялись методы строительной механики в форме метода конечных элементов, методы теории подобия, методы теории надежности строительных конструкций.

Результаты. Разработан двухэтапный алгоритм оценки надежности, отличающийся от ранее разработанных возможностью оценки развития прогрессирующего обрушения. Приведены результаты его апробации для рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов в виде установленных значений показателей надежности для набора ключевых элементов. Аналогичная оценка выполнена для реализованного проекта реконструкции большепролетного покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь).

Выводы. Для оценки надежности исследуемых конструкций с учетом склонности к развитию прогрессирующего обрушения предложен и апробирован в практическом проектировании универсальный алгоритм, ключевыми составляющими которого являются компьютерное моделирование процесса последовательных отказов элементов конструкции и установление для выделенной совокупности ключевых элементов значений вероятности отказа. Выполненные на его основе исследования позволили для рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов выделить набор ключевых элементов консольной части, отказ которых инициирует начало лавинообразного обрушения, и установить для них пределы изменения величин характеристик безопасности и резерва живучести. Дополнительно основные положения разработанного подхода прошли опытную апробацию при разработке и реализации проекта усиления большепролетных несущих конструкций покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические конструкции, численные методы, лавинообразное разрушение, надежность, живучесть

Благодарности. Авторы выражают благодарность организаторам конференции «Расчет и проектирование металлических и деревянных конструкций», посвященной 110-летию со дня рождения Е.И. Белени и 130-летию со дня рождения Г.Г. Карлсена, за возможность представить на ее площадках основные результаты данного исследования, услышать мнение коллег по рассматриваемым вопросам, что было весьма ценно и учтено при подготовке статьи к печати.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мущанов В.Ф., Оржиховский А.Н., Мущанов А.В., Цепляев М.Н. Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 763–777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777

Автор, ответственный за переписку: Владимир Филиппович Мущанов, mvf@donnasa.ru.

Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility

Vladimir F. Mushchanov, Anatoly N. Orzhekhovskiy,
Alexander V. Mushchanov, Maxim N. Tseplyaev
*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA);
Makeevka, Donetsk People's Republic, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Spatial rod metal structures of high level of responsibility are the most frequently used as structural systems for covering large spans of buildings and structures. However, progressive destruction can actively develop in these systems

under unfavorable combination of factors. The aim of the research is to develop scientific justification of new approaches to the design of optimal spatial metal structures resistant to the development of progressive collapse of high level of responsibility with guaranteed levels of reliability of key and secondary elements.

Materials and methods. The main research methods in the work are methods of structural mechanics in the form of the finite element method, methods of similarity theory, and methods of the theory of reliability of building structures.

Results. As a result of the research work for the considered structures, a 2-stage algorithm for assessing reliability was developed, which differs from the previously developed ones by the possibility of assessing the development of progressive collapse. The results of its testing for frame-cantilever structures of coverings over stadium stands are presented in the form of established values of reliability indicators for a set of key elements. A similar assessment was made for the implemented reconstruction project of the long-span covering of the "Ilyichevets" sports complex (Mariupol).

Conclusions. To assess the reliability of the studied structures, taking into account the tendency to the development of progressive collapse, a universal algorithm is proposed and tested in practical design, the main components of which are computer modelling of the process of successive failures of structural elements, and the establishment of failure probability values for the selected set of key elements. The studies carried out on the basis of its algorithm made it possible to identify a set of key elements of the cantilever part for the frame-cantilever coverings above the stadium stands, the failure of which initiates the beginning of an avalanche-like collapse, and to set limits for them to change the values of safety characteristics and survivability reserve. Additionally, the main provisions of the developed approach were experimentally tested during the development and implementation of the project of reinforcement of large-span bearing structures of the covering of the "Ilyichevets" sports complex (Mariupol).

KEYWORDS: metal structures, numerical methods, progressive collapse, reliability, survivability

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the organizers of the conference "Calculation and design of metal and wooden structures", dedicated to the 110th anniversary of the birth of E.I. Belenya and the 130th anniversary of the birth of G.G. Carlsen, for the opportunity to present the main results of this study, to hear the opinion of colleagues on the issues under consideration, which was very valuable and taken into account when preparing the paper for publication.

FOR CITATION: Mushchanov V.F., Orzhehovskiy A.N., Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):763-777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777 (rus.).

Corresponding author: Vladimir F. Mushchanov, mvf@donnasa.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современная нормативная база Российской Федерации в области обеспечения надежности, живучести, предотвращения развития лавинообразного обрушения несущих строительных металлических конструкций представлена рядом документов различного уровня:

1. Федеральные законы:
 - Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.
2. Своды правил, ГОСТы, СНИПы:
 - ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»;
 - СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»;
 - СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования»;
 - проект СНИП «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». М., 2006.
3. Основные рекомендации, содержащие как общие, так и конкретные положения по обеспечению необходимого уровня надежности конструкций, закладываемого на стадии проектирования, в том числе включающие мероприятия по предотвращению развития лавинообразного (прогрессирующего) разрушения:
 - методическое пособие «Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения». 2018;

- СТО 36554501-024–2010 «Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях». 2010;

- МДС 20-2.2008 «Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях». 2008;

- Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения. 2006;

- Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. 2002.

Отметив зарубежный опыт в этом направлении, стоит упомянуть:

- EN 1990:2002+A1. Eurocode — Basis of structural design. Supersedes ENV 1991:1994;

- UFC 4-023–03. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Change 3. Series 4: Multidisciplinary and facility specific design. U.S. Army corps of engineers, 2016;

- GSA. Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. Office of Design and Construction, 2016;

- ДБН В.2.2-24–2009. Проектирование высотных жилых и общественных зданий. Здания и сооружения. Приложение Е «Методика расчета высотного здания на сопротивление к прогрессирующему обрушению: государственные строительные нормы Украины». 2009;

- Rules and Regulations of the Building Code of the City of New York. Chapter 18 Resistance to Pro-

gressive Collapse under Extreme Local Loads. New York State Department of State, 2001;

- BS 5950.1:2000. Structural use of steelwork in building (Incorporating Corrigenda Nos. 1 and 2 and Amendment No. 1): 2.4.5 Structural integrity. British Constructional Steelwork Association, Building Research Establishment Ltd, Cold Rolled Sections Association et. al., 2009;

- Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse. Department for Communities and Local Government, 2011;

- NISTIR 7396. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. USA : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2007;

- ASCE/SEI 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Structural Engineering Institute. Washington : American Society of Civil Engineers, 2005.

Хорошо известные всем специалистам ключевые положения указанных нормативных документов можно свести к трем типам рекомендаций:

- рекомендации общего характера, использование которых в прямом виде в практике проектирования сооружений высокого уровня ответственности, выполненных в форме пространственных стержневых металлических конструкций, зачастую невозможно (на это указывают авторы работы [1]);

- конкретные рекомендации, разработанные для узкого круга конструктивных схем (например, конструкции многоэтажных зданий [2]), ориентированные на разработку соответствующих конструктивных мероприятий;

- рекомендации по определению показателей надежности проектируемой системы здания (сооружения).

Отметим результаты критического анализа научных публикаций, составляющих научную основу этой нормативной базы. Учитывая их значительное количество, в первую очередь сфокусируем внимание на материалах, содержащих данные о подходах к определению показателей надежности конструкции с позиций опасности развития лавинообразного обрушения. В этом случае в подавляющей части рассмотренных работ решение сформулированной проблемы достигается путем решения одной или одновременно нескольких перечисленных ниже задач:

- детализации расчетных схем конструкций (прежде всего путем отображения конструктивных особенностей решения узлового соединения с последующей оценкой влияния такого учета на общее и локальное напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции и ее элементов) [3–8];

- целенаправленного изменения конструктивной схемы здания (сооружения) в целом и/или конструкции узловых соединений, ориентированного на предотвращение развития прогрессирующего

разрушения [9–11], а также посредством управления НДС объекта за счет изменения его основных геометрических и жесткостных параметров [12–15];

- установления численных значений показателей надежности анализируемой расчетной схемы конструкции [16–21].

Однако некоторые важные для рассматриваемой проблемы моменты до настоящего времени остаются исследованными в недостаточной степени, а именно отсутствуют:

- универсальный алгоритм действий при вычислении численных значений характеристик надежности изучаемой системы с позиций оценки склонности анализируемой расчетной схемы конструкции к развитию лавинообразного обрушения, что значительно усложняет работу инженера-проектировщика;

- практические рекомендации по установлению показателей надежности многоэлементных статически неопределимых стержневых металлических конструкций с позиций оценки их склонности к прогрессирующему (лавинообразному) обрушению (за исключением некоторых попыток [22, 23]);

- алгоритм оптимизации начального проектного решения для сформулированного вида целевой функции на основе заданных уровней надежности ключевых и второстепенных элементов (некоторые попытки в этом направлении сделаны в работах [22–24]).

Проведенный критический анализ состояния вопроса, кратко отраженный в данном разделе настоящей работы, позволяет сформулировать цель и задачи проводимых авторами исследований, выполняемых в рамках НИР «Научное обоснование новых подходов к проектированию оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности» на основе Соглашения № 22-29-00139 между Российским научным фондом и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (с 05.10.2023 соглашение к исполнению переведено в ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»).

Цель исследования — разработка научного обоснования новых подходов к проектированию устойчивых к развитию прогрессирующего обрушения оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности с гарантированными уровнями надежности ключевых и второстепенных элементов.

Задачи исследования:

- разработать принципы формирования и оценки влияния детализации расчетных схем конструктивных элементов пространственных стержневых металлических конструкций на базе детального конечно-элементного моделирования;

- обосновать установившиеся и аварийные расчетные ситуации для оценки склонности анализируемых систем к лавинообразному обрушению;

- обосновать для систем повышенного уровня ответственности новый критерий склонности к прогрессирующему (лавинообразному) обрушению, базирующемуся на изменении индекса надежности $\Delta\beta$;
- разработать общий алгоритм оптимального проектирования конструкций повышенного уровня ответственности с соблюдением ранжированных уровней надежности для ключевых и второстепенных элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках разрабатываемого подхода основные этапы проводимой оценки качества проектного решения пространственной металлической конструкции высокого уровня ответственности коррелируют с основными задачами исследования и в общем виде представлены на рис. 1.

На указанных этапах исследования авторами использовались методы:

- *конечных элементов* в геометрически и конструктивно нелинейной постановке (как универсальный метод строительной механики для анализа НДС при оценке склонности систем к лавинообразному обрушению);
- *теории подобия* при физическом моделировании действительной работы элементов пространственных стержневых металлических конструкций (для верификации результатов численных исследований НДС на моделях конструкций);
- *теории надежности строительных конструкций* (при определении значений вероятности отказа системы и формировании критерия склонности системы к лавинообразному обрушению);
- *оптимального проектирования* (при совершенствовании исходного проектного решения на основе заданных ограничений по вероятности отказа ключевых и второстепенных элементов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Обоснование анализируемых расчетных ситуаций, положенных в основу дальнейших расчетов

В настоящее время большая часть компьютерных расчетов, выполняемых для проверки склонности конструкций к развитию лавинообразного обрушения, использует положения нормативного

документа, разработанного МНИИТЭП и НИИЖБ «Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения» (2005), а именно:

- в качестве главного способа, предупреждающего развитие лавинообразного обрушения, принимается общее упрочнение всего здания, при котором разрушение одного из элементов не приводит к разрушению всего сооружения;
- оценка склонности к прогрессирующему обрушению проверяется нелинейным расчетом на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и временные длительные нагрузки, а также воздействие локальных разрушений элементов несущих конструкций;
- расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов принимаются равными их нормативным значениям.

В качестве основных неопределенностей, заложенных в этих расчетах, можно отметить (на это указывают и другие исследователи):

- невозможность получения достоверной информации о фактических местах, причинах возникновения и характере протекания процесса разрушения;
- статистическую изменчивость значений прочностных параметров, приводящую к тому, что фактические значения параметров разрушения могут значительно отличаться от нормативных значений;
- как невозможно запроектировать абсолютно надежное сооружение (в силу изменчивости значимых параметров проектирования, влияющих на надежность системы; неопределенности требований к анализируемым расчетным ситуациям и т.д.), так и невозможно существенно повысить его надежность без дополнительных затрат, ориентированных на предотвращение аварийных ситуаций.

Анализируя вышеприведенные основные положения как нормативных документов, так и результатов научных исследований, можно констатировать.

1. Суммарное действие постоянной нагрузки и длительной части временных нагрузок, действующих на сооружение, для анализируемой расчетной ситуации является загрузением первого расчетного этапа.

2. Рекомендации действующих нормативных документов в части назначения элемента конструк-

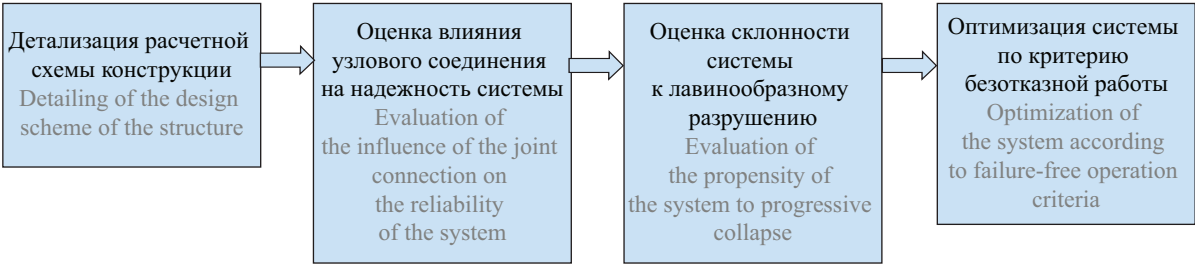


Рис. 1. Ключевые этапы совершенствования методики расчета и проектирования конструкций повышенного уровня ответственности

Fig. 1. Key points for improving the methodology of calculation and design of structures of a high level of responsibility

ции (или некоторой совокупности элементов), удаляемых на втором этапе расчета, отличаются невозможностью прямого применения для рассматриваемых в данной работе систем. При этом остаются бесспорными факты, что:

- в рамках анализируемой расчетной ситуации для рассматриваемой схемы загрузки при увеличении временных длительных нагрузок (как правило, атмосферных) за пределы расчетных значений, установленных нормами, первыми будут выходить из строя наиболее нагруженные элементы;

- даже в случае преднамеренного вывода из строя элементов конструкции (например, при проведении террористических актов) воздействию, в первую очередь, подвергаются наиболее нагруженные элементы конструкции, которые легче разрушить. Для обоснованного назначения удаляемого на втором этапе расчета ключевого элемента конструкции (или некоторой совокупности таковых), разрушение которого провоцирует развитие лавинообразного разрушения, возможен подход, при котором поэтапное удаление элементов, формирующих в конечном итоге упомянутый ключевой набор, будет следствием пошагового увеличения значений временных длительных нагрузок первого этапа за пределы расчетных значений.

3. Учитывая, что материалом для подавляющего большинства несущих элементов пространственных стержневых металлических конструкций служат малоуглеродистые и низколегированные стали с ярко выраженной площадкой текучести, то отказ элементов системы (как сжатых, так и растянутых), выполненных из этих материалов, сопровождается значительным развитием пластических деформаций, что кардинально отличается от хрупкого разрушения, характерного для элементов железобетонных конструкций, и «сглаживает» возможные инерционные эффекты, сопровождающие такой отказ. Поэтому при установлении набора ключевых элементов в рамках первичной оценки склонности конструкции к прогрессирующему обрушению возможно отказаться от значения коэффициента динамичности $\mu = 2$, принятого, например, для расчета железобетонных каркасов зданий в универсальном расчетном комплексе SCAD Office.

Отмеченные положения использованы при составлении и реализации алгоритма, информация по которым представлена в следующих разделах.

2. Описание алгоритма оценки склонности конструкции к лавинообразному обрушению

В основу разрабатываемого алгоритма оценки надежности рассматриваемых пространственных стержневых конструкций высокого уровня ответственности с учетом склонности к развитию прогрессирующего обрушения положен двухэтапный подход, составляющими которого служат:

- компьютерное моделирование процесса последовательных отказов элементов конструкции

с выделением набора ключевых элементов системы, отказ которых инициирует начало процесса прогрессирующего разрушения;

- установление для выделенной совокупности ключевых элементов двух значений характеристики безопасности β , соответствующих отказу первого ключевого элемента и их совокупности.

Несмотря на некоторые нюансы формулировок понятия надежности различными нормативными документами в целом его можно сформулировать как «способность сооружения выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики, при определенных условиях эксплуатации, в установленный период». Численным выражением показателей надежности, как правило, являются:

- P_s — вероятность безотказной работы;
- P_f — вероятность отказа;
- β — характеристика безопасности в отечественной терминологии или индекс надежности в зарубежной практике.

На правомочность их использования указывают большинство нормативных документов, действующих в различных странах. В данной работе использован показатель $\beta_{\min}$, определяемый для каждого из наиболее ответственных элементов, что не противоречит требованиям вышеперечисленных документов.

Другая отличительная особенность описываемого в статье подхода — возможность оценки склонности анализируемой схемы конструкции к развитию лавинообразного разрушения, под этим понимается *последовательное обрушение конструкций здания (или его части в виде двух или более пролетов, двух и более этажей), потерявших опору в результате локального разрушения отдельных несущих конструктивных элементов*, посредством численной оценки вероятности наступления такого события. Для этой цели предложен показатель $\beta_{\max}$, характеризующий вероятность отказа всей совокупности ключевых элементов, выход из строя которых предшествует последующему развитию лавинообразного разрушения конструкции.

Как известно, по общепринятой терминологии «*живучесть* — это свойство в течение некоторого времени сохранять несущую способность при локальных разрушениях (при аварийных ситуациях), вызванных природными и технологическими воздействиями. А именно стойкость конструкции (здания и сооружения) к прогрессирующему разрушению при зафиксированных аварийных повреждениях и локальных разрушениях». Рассматривая и эту часть исследования с единых методических позиций, в разрабатываемом подходе предложен новый параметр $\Delta\beta$ (резерв живучести системы), характеризующий разницу в вероятности наступления двух событий:

$\beta_{\min}$ — отказа одного, наиболее напряженного элемента, характеризующего первичное нарушение требований надежности;

$\beta_{\max}$ — отказа совокупности ключевых элементов, характеризующего полное исчерпание их несущей способности с последующим развитием лавинообразного обрушения.

Установление набора ключевых элементов анализируемой системы

На этом этапе в форме конечно-элементного расчета, реализуемого в детерминированной геометрически и конструктивно нелинейной постановке, на базе пошагового увеличения расчетных нагрузок основного сочетания анализируется последовательность отказа элементов и устанавливается такая их совокупность (набор ключевых элементов), которая предшествует началу лавинообразного разрушения. Учет геометрической нелинейности осуществляется с использованием корректирующих коэффициентов к соответствующим компонентам матрицы жесткости элемента, насчитываемых с учетом влияния напряжений в элементах, накопленных на предыдущих этапах расчета в форме [25]. Учет конструктивной нелинейности, учитывающий изменение расчетной схемы под действием нагрузки, осуществляется в упрощенной форме, когда сжатые стержни просто удаляются из конструкции, а взамен удаленных растянутых стержней в узлы их крепления прикладываются внутренние усилия, действовавшие в элементе, но с противоположным знаком (обоснованность данной методики рассматривается в работе Н.С. Стрелецкого [26]). Алгоритм предложенной методики представлен в виде блок-схемы на рис. 2 и более подробно описан в трудах [27–29].

Определение численных значений показателей надежности проектируемой конструкции с учетом склонности к лавинообразному разрушению

В рамках этого этапа расчета выполняется установление показателей надежности проектируемой системы в виде значений вероятности отказа и характеристики безопасности. При этом данные показатели надежности системы увязываются с анализом склонности системы к лавинообразному разрушению и представляются в виде двух показателей:

$\beta_{\min}$ — соответствующего вероятности отказа одного, наиболее напряженного элемента;

$\beta_{\max}$ — соответствующего вероятности отказа совокупности ключевых элементов, отказ которых инициирует начало процесса лавинообразного разрушения, определенных в результате расчетов, выполненных с использованием алгоритма, представленного на рис. 2. Вероятность отказа отмеченной совокупности анализируется с позиций модели параллельного соединения элементов и с учетом степени взаимозависимости рассматриваемой пары элементов в процессе вычисления [30].

В разделе 3 данного исследования в качестве случайных величин выступают:

- предел текучести стали;

- нормальные напряжения в стержневых элементах конструкции;

- атмосферные (как правило, снеговые) нагрузки;

- геометрические характеристики сечений;

- осадки основания;

- геометрические несовершенства формы конструкции, полученные на монтаже и при эксплуатации.

Задача определения вероятности отказа решается общепринятым численным методом статистического моделирования — Монте-Карло. С его использованием формируется выборка напряжений для рассматриваемой группы ключевых элементов на основе 10^6 – 10^8 реализаций случайных величин по заданным законам распределения. Для сформированных выборок реализаций случайных величин напряжений и прочностных характеристик материала элементов конструкции определяются их законы и плотности распределения и на их основе другие необходимые статистические характеристики с последующим определением $\beta_{\min}$ для каждого из элементов. Полученная база данных служит основой для последующего определения величины $\beta_{\max}$, характеризующей вероятность отказа совокупности ключевых элементов с использованием для этой цели модели параллельного соединения элементов¹ и $\Delta\beta$ — резерва живучести системы. Более подробно данный алгоритм описан в работе [30], а его принципиальная блок-схема приведена на рис. 3.

3. Примеры реализации разработанного подхода

Апробация представленных в разделе 2 алгоритмов вычисления показателей надежности с учетом оценки склонности исходных проектных решений к развитию прогрессирующего (лавинообразного) обрушения выполнена при проектировании разнообразных пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности. Ниже приведены результаты проведенных исследований.

Рамно-консольные покрытия над трибунами стадионов

Рассматриваемый тип покрытия, как правило, ориентирован на устройство покрытий над трибунами стадионов малой и средней вместимости и довольно широко применяется при реконструкции стадионов в процессе приведения их технического состояния к современным требованиям. Исследованию подлежала конструкция в виде блока консольных рам с параметрами (рис. 4, а): $L = 4$ – 22 м — вылет консольной фермы покрытия; $\alpha = 0$ – 30° — угол наклона покрытия к горизонту; $H = 4$ – 12 м — шаг несущих рам. В исследуемый диапазон попадали параметры покрытия над трибунами запасных полей ФК «Олимпик» (г. Донецк) (рис. 4, б, в), проектируемого с использованием описываемого подхода.

¹ Ржаницын А.П. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. С. 136–138. URL: <https://dwg.ru/lib/1942?ysclid=1q9iz905g223783815>

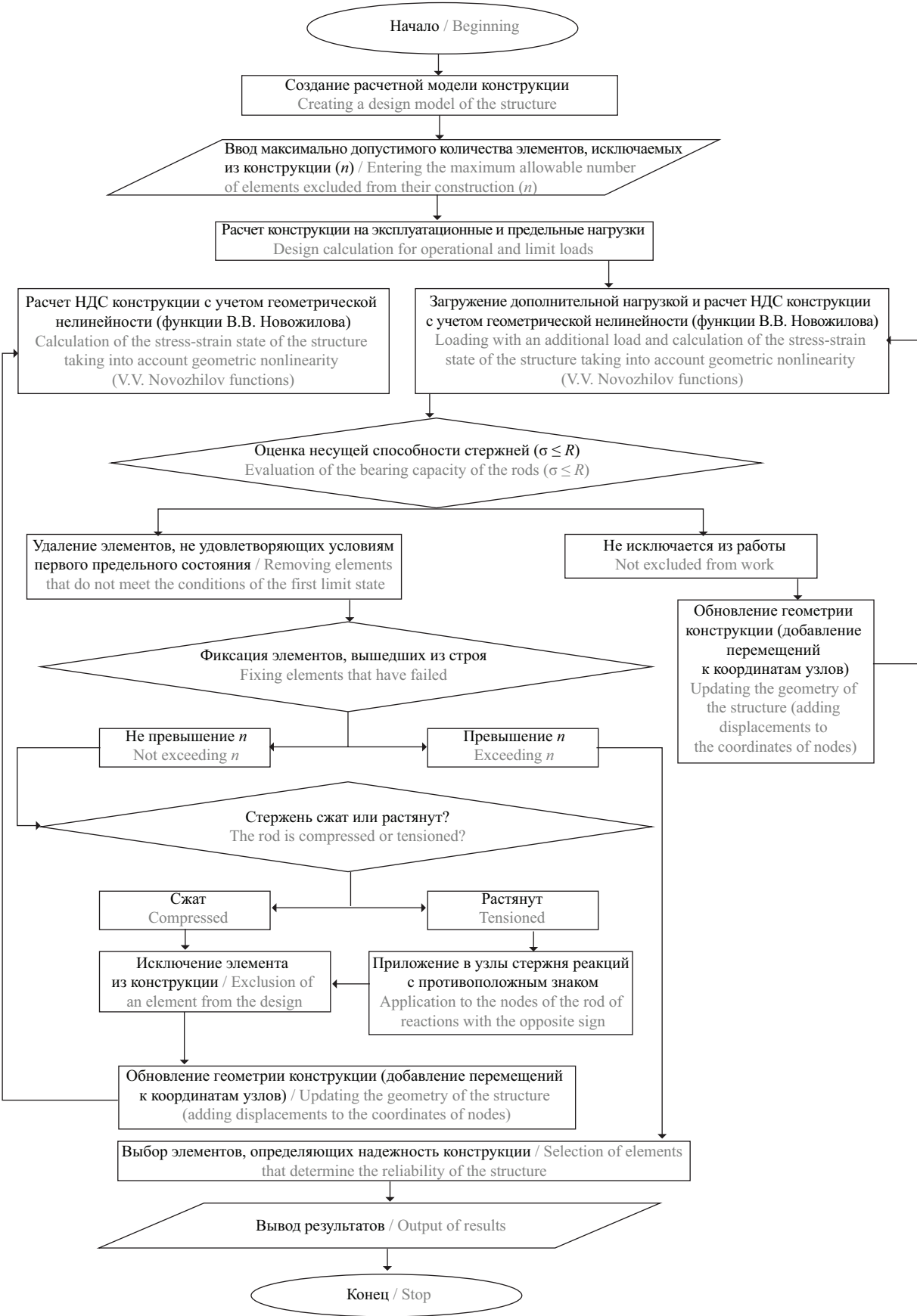


Рис. 2. Блок-схема алгоритма установления набора ключевых элементов, инициирующих начало прогрессирующего разрушения конструкции

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for setting key elements that initiate the onset of a progressive collapse of the structure

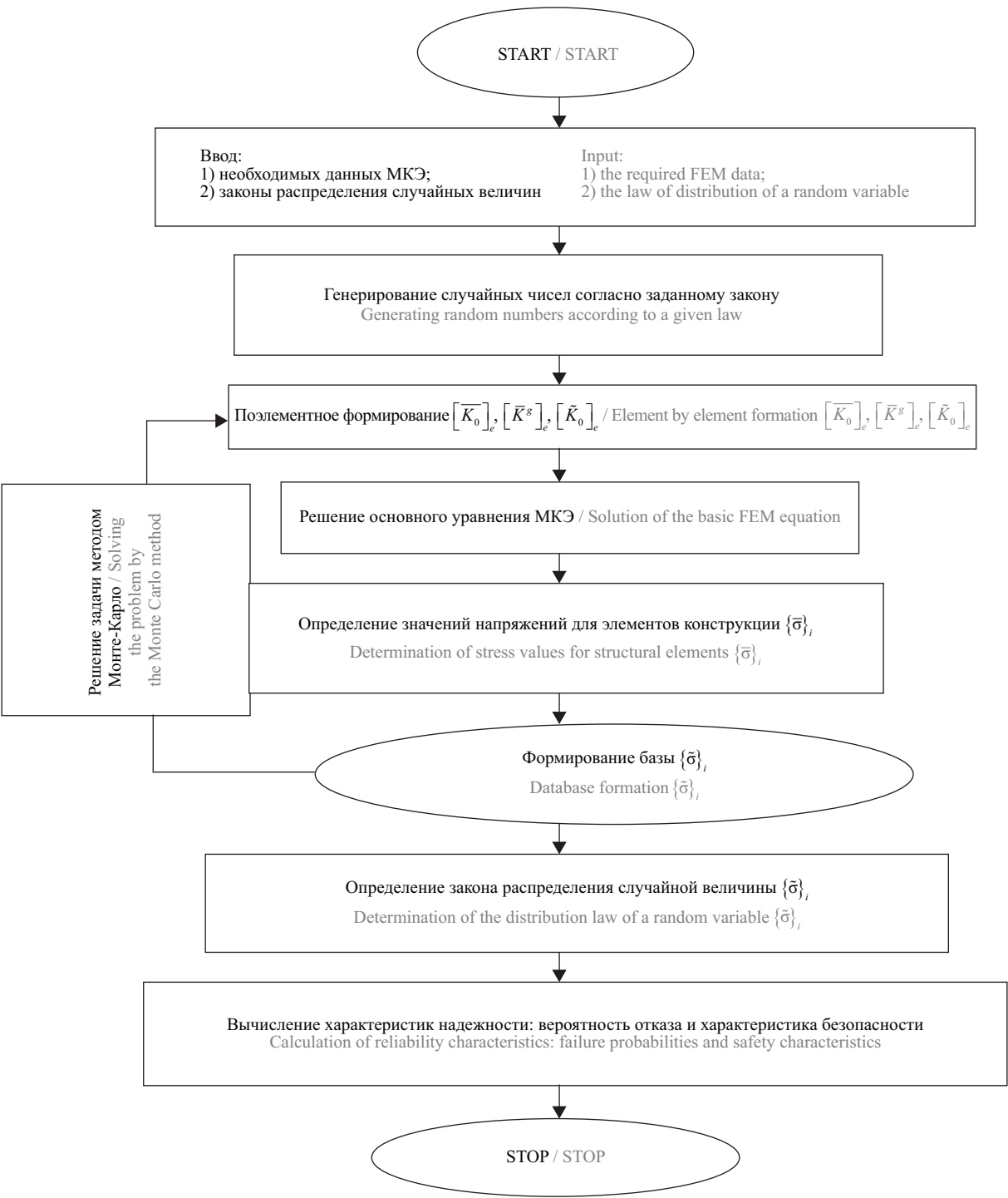


Рис. 3. Блок-схема определения показателей надежности конструкции с учетом склонности к лавинообразному обрушению

Fig. 3. Block diagram of determining the reliability indicators of the structure, taking into account the tendency to avalanche collapse

Исследования по оценке склонности к лавинообразному обрушению позволили выделить набор из 4–10 элементов консольной части, отказ которых в виде цепочки вышедших из строя элементов (например, «0 – 4 – 24 – 334») инициировал начало лавинообразного обрушения (см. гистограмму рис. 4, *d*). Проведенные исследования дали возможность зафиксировать, что для анализируемых исходных

расчетных схем, запроектированных в полном соответствии с требованиями метода предельных состояний, диапазон изменения величин характеристик безопасности для их ключевых элементов составил: $\beta_{\min} = 3,08–5,01$; $\beta_{\max} = 5,01–7,81$. При этом явно отмечалось, что величина резерва живучести характеризует разницу в величине характеристики безопасности, вычисленной для одного, наиболее напряженного

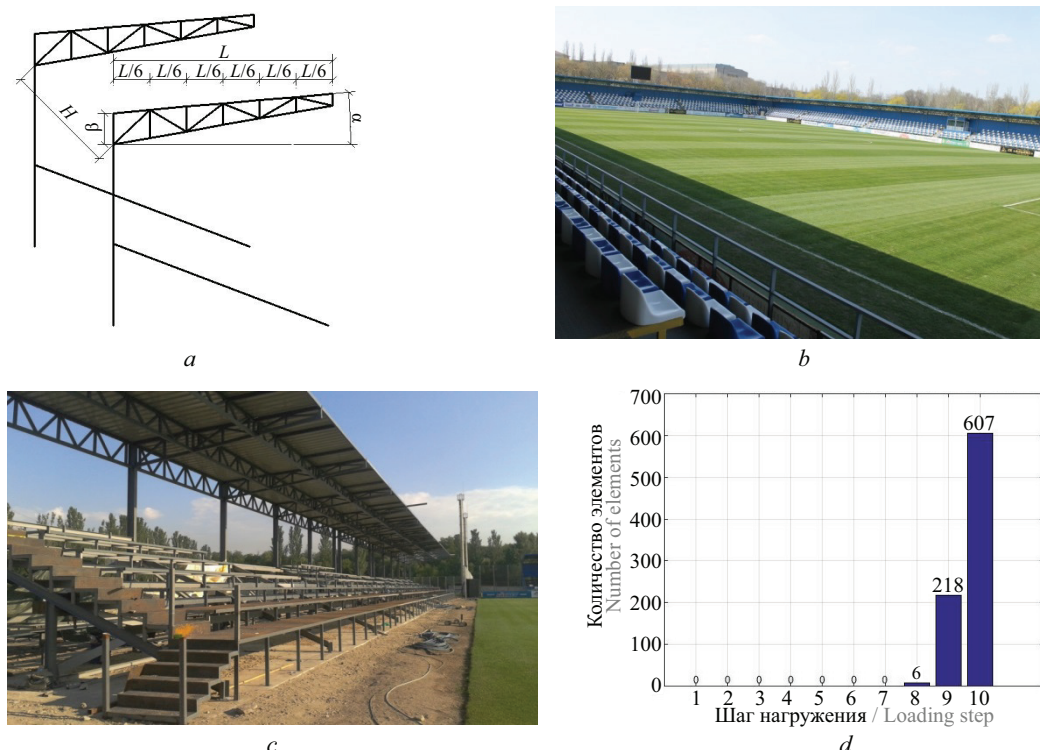


Рис. 4. Исследование консольно-рамных покрытий над трибунами стадионов: *a* — конструктивная схема покрытия; *b* — общий вид стадиона «Олимпик» (Донецк); *c* — вид на проектируемое покрытие над трибунами; *d* — гистограмма накопления отказов элементами конструкции по шагам нагружения

Fig. 4. Study of cantilever-frame coverings over stadium stands: *a* — structural scheme of the covering; *b* — a general view of the “Olympic” stadium (Donetsk); *c* — a view of the designed covering over the stands; *d* — a histogram of the accumulation of failures by elements of the structure by steps of loading

ключевого элемента и всей их совокупности $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min} < 2$, и склонность к развитию прогрессирующего обрушения, которая резко увеличивается. *Пространственное стержневое покрытие спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь)»*

На основе данных проведенного обследования и оценки технического состояния с участием авторов данного исследования выполнен и успешно реализован в июле 2023 г. проект восстановления несущих металлоконструкций уникального покрытия спорткомплекса «Ильичевец» в г. Мариуполе. Уникальное покрытие, основным несущим конструктивом которого являются большепролетные арки сквозного сечения с затяжками ($L = 95$ м), получило в ходе боев за освобождение г. Мариуполя не менее десяти прямых попаданий, в результате которых возникли недопустимые повреждения (рис. 5, *a, b*). Проектные работы по восстановлению комплекса проводились специалистами ФГБОУ ВО «ДОННАСА» совместно с ГУП «Донецкпроект», а строительно-монтажные работы выполнены компанией «Р-Строй». Следует отметить, что наряду со сравнительно простыми случаями, когда усиление поврежденных элементов выполнялось при помощи накладок, компенсирующих потерю сечения, наиболее сложным случаем стала необходимость усиления пяти ферм на проектной отметке, когда

в результате прямых попаданий снарядов в верхние пояса сквозных арок наблюдались отрывы от узлов и недопустимые деформации всех элементов панели, что требовало их полной замены (рис. 6, *a*). С этой целью была разработана специальная технологическая оснастка, позволяющая выполнить работы по устранению полученных повреждений без трудоемких работ, связанных с устройством лесов. На рис. 6, *d* представлены ее основные элементы: 1 — монтажные балки со 100-тонными гидродомкратами для исправления геометрии и фиксации полуарок в проектном положении; 2 — поперечные короткие балки с оттяжками; 3 — восстановленный элемент верхнего пояса в проектном положении. Также для уменьшения вертикальных перемещений концов полуарок вследствие демонтажа поврежденных панелей перед началом работ в систему были введены дополнительные вертикальные связи.

Наряду с традиционными расчетами, выполненными при разработке проектной документации в части оценки остаточной несущей способности и контроле НДС конструкции на всех этапах усиления, проведены дополнительные исследования уникального большепролетного покрытия в рамках разработанного подхода в части оценки склонности к прогрессирующему (лавинообразному) обру-

шению и оценки надежности проектного решения с учетом данного фактора.

Анализ характеристик надежности проекта, выполненный для усиливаемой расчетной схемы на обоих этапах, подтвердил адекватность расчетной модели картине, полученной в ходе обследования. На это указывает как качественное совпадение картины повреждения арки покрытия (рис. 6, *a*) с имитационной картиной отказа стержней, представленной по результатам расчета с использованием разработанных алгоритмов, так и установленные $\Delta\beta$.

Верификация разработанного подхода осуществлялась в виде анализа трех расчетных ситуаций:

- исходной (восстановленной) расчетной схемы (схема А), загруженной расчетным сочетанием проектных нагрузок;
- поврежденной конструкции (по данным обследования) (схема Б), загруженной расчетным сочетанием проектных нагрузок;
- исходной конструкции, загруженной аварийной нагрузкой (импульсное взрывное воздействие) (схема В, анализировалась лишь картина отказа стержней).

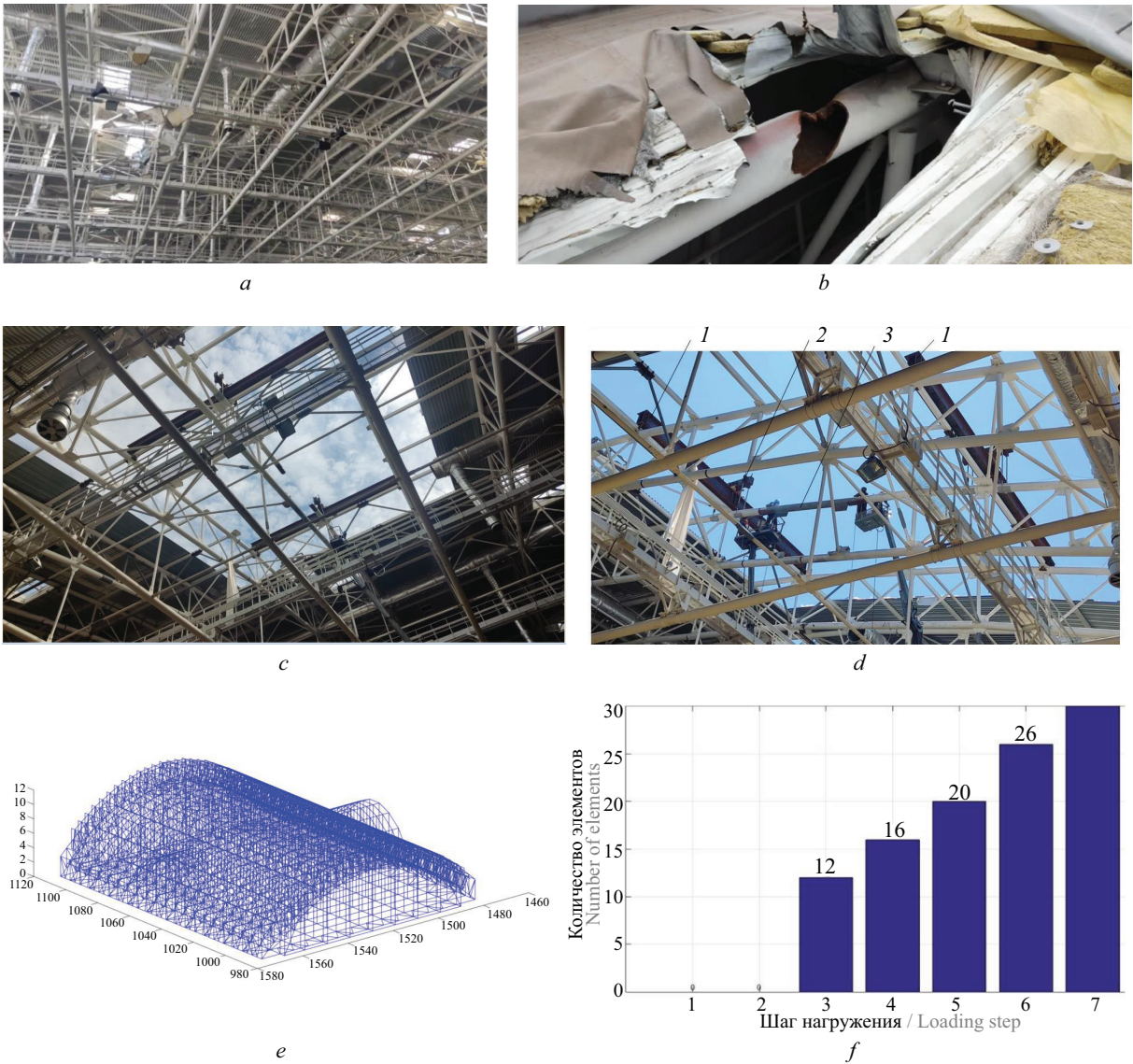


Рис. 5. Усиление несущих конструкций большепролетного покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь): *a* — общий вид конструкции покрытия с повреждениями; *b* — повреждение верхнего пояса арки покрытия; *c* — усиливаемая арка с демонтированным поврежденным элементом; *d* — усиление конструкции по разработанному проекту: 1 — монтажные балки с гидродомкратами; 2 — поперечины с оттяжками; 3 — восстановленный элемент; *e* — расчетная схема конструкции покрытия; *f* — гистограмма выхода из строя элементов при анализе на лавинообразное обрушение

Fig. 5. Reinforcement of load-bearing structures of the large-span covering of the "Ilyichevets" sports complex (Mariupol): *a* — a general view of the structure of the covering with damage; *b* — damage to the upper chord of the covering arch; *c* — reinforced arch with dismantled damaged element; *d* — reinforcement of the structure according to the developed project: 1 — mounting beams with hydraulic jacks; 2 — crossbars with guy ropes; 3 — restored element; *e* — design scheme of the covering structure; *f* — histogram of elements failure in the analysis of avalanche collapse

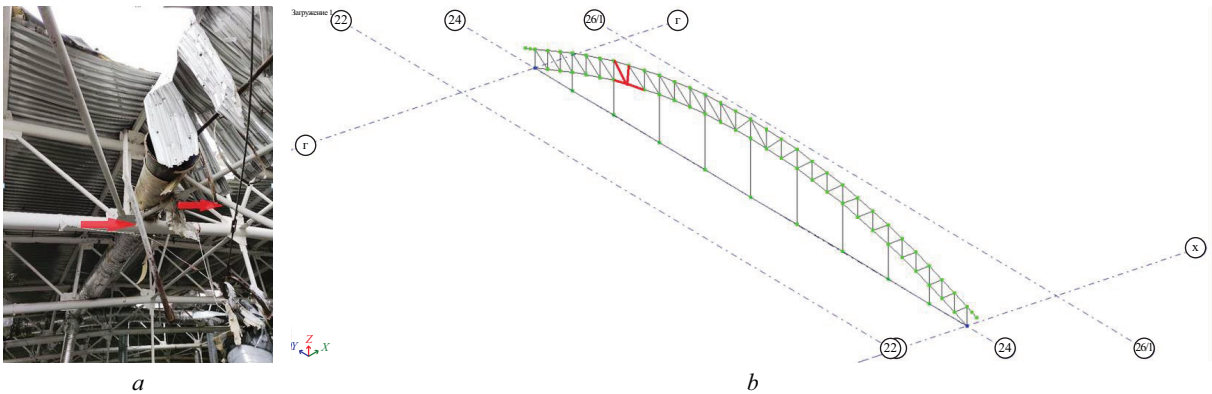


Рис. 6. Анализ характеристик надежности проекта усиления несущих конструкций большепролетного покрытия спорт-комплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь): *a* — картина повреждения арки покрытия; *b* — имитационная картина отказа стержней в расчетной схеме

Fig. 6. Analysis of the reliability characteristics of the project of reinforcement of load-bearing structures of the large-span covering of the “Ilyichevets” sports complex (Mariupol): *a* — a picture of damage to the arch of the covering; *b* — a simulation picture of the failure of rods in the design scheme

Значения характеристики безопасности для анализируемых расчетных ситуаций

Values of the safety characteristic for the analyzed calculation situations

Значения характеристики безопасности Values of the safety characteristic	Схема А Scheme A	Схема Б Scheme B
$\beta_{\min}$	7,091	2,424
$\beta_{\max}$	10,6	5,9

Для двух анализируемых расчетных ситуаций определены значения $\beta_{\min}$ и $\beta_{\max}$, приведенные в таблице.

Анализируя приведенные в таблице данные, следует отметить, что изначально элементы системы обладали большими запасами несущей способности (показатели для схемы А), что позволило системе сравнительно безболезненно воспринять полученные повреждения перераспределением нагрузки на уцелевшие элементы (сравнение данных для схем А и Б). Дополнительный анализ аварийной ситуации показывает, что при импульсном воздействии на незагруженную временными нагрузками систему упруго-пластические деформации элементов в зоне поражения локализуют зону разрушения одной панелью и склонность к развитию лавинообразного разрушения не проявляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критический анализ результатов, полученных в ходе проведенного исследования, предоставляет исходную информацию для возможной дискуссии, позволяет зафиксировать положительные достижения и наметить пути дальнейшего совершенствования разрабатываемого подхода:

1) предложенный в данном исследовании подход дает возможность с приемлемой практической точностью определить показатели надежности многократно статически неопределимой стержневой

системы, характеризующие ее склонность к развитию прогрессирующего разрушения. Вычисляемые показатели особенно важны для уникальных большепролетных конструкций, представляющих собой сооружения с высоким уровнем ответственности, для которых важно расчетным путем обеспечить требуемый уровень надежности и живучести;

2) дальнейшие исследования, осуществляемые авторами в части совершенствования разрабатываемого подхода, планируется направить на более строгое теоретическое обоснование реализованных в алгоритмах положений, а именно:

- гипотезы об установлении верхней границы надежности, определяемой на основе вероятности отказа группы элементов, инициирующих начало лавинообразного обрушения;
- обоснование расчетных ситуаций, на основании анализа которых устанавливается набор ключевых элементов, надежность которых определяет устойчивость системы к развитию прогрессирующего разрушения;
- установление рекомендуемых значений динамических коэффициентов для элементов основных конструктивных форм пространственных стержневых металлических пространственных, выполняемых из различных классов стали;
- учета конструктивного исполнения узловых соединений в моделях надежности.

В качестве основных выводов по данному исследованию можно отметить следующее:

1) для оценки надежности пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности с учетом склонности к развитию прогрессирующего обрушения предложен и апробирован в практическом проектировании универсальный алгоритм, основными составляющими которого являются:

- компьютерное моделирование процесса последовательных отказов элементов конструкции с выделением набора ключевых элементов системы, отказ которых инициирует начало процесса прогрессирующего разрушения;

- установление для выделенной совокупности ключевых элементов двух значений характеристики безопасности β , соответствующих отказу первого ключевого элемента и их совокупности.

Анализ НДС осуществляется с использованием уточненных расчетных схем, отображающих основные конструктивные особенности узловых соединений, дефектов и повреждений.

Выполненные на основании предложенного подхода и разработанного алгоритма исследования по оценке склонности рассматриваемых конструктивных систем к лавинообразному обрушению позволили для рамно-консольных покрытий над три-

бунами стадионов зафиксировать следующие результаты:

- выделить в зависимости от геометрических параметров исследуемой схемы набор из 4–10 ключевых элементов консольной части, отказ которых инициирует начало лавинообразного обрушения;

- диапазон изменения величин характеристик безопасности ключевых элементов конструкций, запроектированных в полном соответствии с требованиями метода предельных состояний, составил: $\beta_{\min} = 3,08\text{--}5,01$; $\beta_{\max} = 5,01\text{--}7,81$;

- величина резерва живучести, составляющая разность величин характеристики безопасности, вычисленной для одного, наиболее напряженного ключевого элемента и всей их совокупности $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min} < 2$, характеризует склонность исследуемой схемы к развитию прогрессирующего обрушения.

Основные положения разработанного подхода к оценке надежности проектных решений пространственных металлических конструкций высокого уровня ответственности прошли опытную апробацию при разработке и реализации проекта усиления большепролетных несущих конструкций покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь). В ходе выполнения работ зафиксировано хорошее соответствие результатов теоретических исследований с данными натурного освидетельствования на всех этапах усиления конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. EDN ZIJLAD.

2. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 8 (92). Pp. 155–162. DOI: 10.18720/MCE.92.13. EDN ZZORLS.

3. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082

4. Savin S.Y., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012089

5. Guo Z., Li Z., Xing Z., Chen Y., Zheng Z., Lin G. Numerical analyses of post-fire beam-column assemblies with WUF-B connections against progressive collapse //

Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 140. P. 106502. DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2022.106502

6. Li H., Wang C., Han J. Research on effect of random initial imperfections on bearing capacity of single-layer spherical reticulated shell // Industrial Construction. 2018. Vol. 48. Pp. 23–27. DOI: 10.13204/j.gyjz20180402

7. Zhi X., Li W., Fan F., Shen S. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure // Spatial Structures. 2021. Vol. 27. P. 7. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009

8. Liu H., Zhang W., Yuan H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections // Engineering Structures. 2016. Vol. 124. Pp. 473–479. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.046

9. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 7 (91). Pp. 3–15. DOI: 10.18720/MCE.91.1. EDN GDKVHM.

10. Zheng L., Wang W., Li H. Progressive collapse resistance of composite frame with concrete-filled steel tubular column under a penultimate column removal scenario // Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 189. P. 107085. DOI: 10.1016/J.JCSR.2021.107085

11. Truesdell C. Novozhilov's foundations of the nonlinear theory of elasticity (1953) // *An Idiot's Fugitive Essays on Science*. 1984. Pp. 151–157. DOI: 10.1007/978-1-4613-8185-3_15
12. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 2 (102). P. 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14. EDN ZVLLVV.
13. Xin T., Zhao J., Cui C., Duan Y. A non-probabilistic time-variant method for structural reliability analysis // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2020. Vol. 234. Issue 5. Pp. 664–675. DOI: 10.1177/1748006X20928196
14. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions // *Developments in the Built Environment*. 2022. Vol. 12. P. 100087. DOI: 10.1016/J. DIBE.2022.100087
15. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Мосина Н.В. Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса «SCAD Office» // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 2 (4). С. 13–18. EDN NBMYRH.
16. Ram M., Davim J.P. Acknowledgments // *Advances in System Reliability Engineering*. 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-815906-4.09998-X
17. Yang W., Zhang B., Wang W., Li CQ. Time-dependent structural reliability under nonstationary and non-Gaussian processes // *Structural Safety*. 2023. Vol. 100. P. 102286. DOI: 10.1016/J. STRUSAFE. 2022.102286
18. Krejsa M., Janas P., Krejsa V. Structural reliability analysis using DOProC Method // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 142. Pp. 34–41. DOI: 10.1016/J. PROENG.2016.02.010
19. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 103–113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113
20. Zhang Z., Jiang C. Evidence-theory-based structural reliability analysis with epistemic uncertainty : a review // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2021. Vol. 63. Issue 6. Pp. 2935–2953. DOI: 10.1007/s00158-021-02863-w
21. Ведяков И.И., Райзер В.Д. Надежность строительных конструкций. Теория и расчет : монография. М. : АСБ, 2018. 414 с. EDN YTYHTE.
22. Truong V.H., Kim S.E. Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm // *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 121. Pp. 59–74. DOI: 10.1016/J. ADVENGSOFT.2018.03.006
23. Saad L., Chateaufneuf A., Raphael W. Robust formulation for Reliability-based design optimization of structures // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018. Vol. 57. Issue 6. Pp. 2233–2248. DOI: 10.1007/s00158-017-1853-7
24. Yang M., Zhang D., Han X. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 366. P. 113018. DOI: 10.1016/j.cma. 2020.113018
25. Корноухов Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем: упругие рамы, фермы и комбинированные системы. М. : Стройиздат, 1949. 376 с.
26. Стрелецкий Н.С. Избранные труды / под ред. Е.И. Беленя. М. : Стройиздат, 1975. 423 с.
27. Mushchanov V.P., Orzhekhovskii A.N., Zubenko A.V., Fomenko S.A. Refined methods for calculating and designing engineering structures // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 2 (78). Pp. 101–115. DOI: 10.18720/MCE.78.8. EDN XPKZTN.
28. Mushchanov V.F., Orzhekhovsky A.N. Numerical methods in assessing the reliability of spatial metal structures of a high level of responsibility // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. Vol. 106. Issue 1. P. 10605. DOI: 10.4123/CUBS.106.05
29. Мушанов А.В., Цепляев М.Н. Новые подходы в оценке устойчивости элементов пространственных металлических конструкций // *Наука и творчество: вклад молодежи : сб. мат. Всерос. мол. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2022. С. 196–200. EDN NEWMKM.
30. Orzhekhovskiy A., Priadko I., Tanasoglo A., Fomenko S. Design of stadium roofs with a given level of reliability // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. P. 110245. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110245

Поступила в редакцию 4 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Филиппович Мушанов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Анатолий Николаевич Оржеховский — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 3058-6140, Scopus: 85079126906, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Александр Владимирович Муцанов — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 4194-7922, ResearcherID: HDO-4425-2022, ORCID: 0000-0002-4381-9476; a.v.mushchanov@donnasa.ru;

Максим Николаевич Цепляев — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 5039-9174, Scopus: 57208101665, ORCID: 0000-0002-1729-4127; m.n.cepliaev@donnasa.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vedyakov I.I., Eremeev P.G., Odesskiy P.D., Popov N.A., Solovyev D.V. Regulatory requirements for the design of building structures for progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 4:16-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. EDN ZIJLAD. (rus.).
2. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 8(92):155-162. DOI: 10.18720/MCE.92.13. EDN ZZORLS.
3. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018; 173:122-149. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2018.06.082
4. Savin S.Y., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456:012089. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012089
5. Guo Z., Li Z., Xing Z., Chen Y., Zheng Z., Lin G. Numerical analyses of post-fire beam-column assemblies with WUF-B connections against progressive collapse. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 140:106502. DOI: 10.1016/J. ENGFAILANAL.2022.106502
6. Li H., Wang C., Han J. Research on effect of random initial imperfections on bearing capacity of single-layer spherical reticulated shell. *Industrial Construction*. 2018; 48:23-27. DOI: 10.13204/j.gyjz20180402
7. Zhi X., Li W., Fan F., Shen S. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure. *Spatial Structures*. 2021; 27:7. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009
8. Liu H., Zhang W., Yuan H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections. *Engineering Structures*. 2016; 124:473-479. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.046
9. Alekseytsev A.V., Gaile L., Druks P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 7(91):3-15. DOI: 10.18720/MCE.91.1. EDN GDKVHM.
10. Zheng L., Wang W., Li H. Progressive collapse resistance of composite frame with concrete-filled steel tubular column under a penultimate column removal scenario. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 189:107085. DOI: 10.1016/J. JCSR.2021.107085
11. Truesdell C. Novozhilov's Foundations of the nonlinear theory of elasticity (1953). *An Idiot's Fugitive Essays on Science*. 1984; 151-157. DOI: 10.1007/978-1-4613-8185-3_15
12. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perel'muter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 2(102):10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14. EDN ZVLLVV.
13. Xin T., Zhao J., Cui C., Duan Y. A non-probabilistic time-variant method for structural reliability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2020; 234(5):664-675. DOI: 10.1177/1748006X20928196
14. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions. *Developments in the Built Environment*. 2022; 12:100087. DOI: 10.1016/J. DIBE.2022.100087
15. Perel'muter A.V., Kriksunov E.Z., Mosina N.V. Implementation of calculation of monolithic residential buildings for progressive (avalanche-like) collapse in the environment of the computer complex "SCAD Office". *Magazine of Civil Engineering*. 2009; 2(4):13-18. EDN NBMYRH. (rus.).
16. Ram M., Davim J.P. Acknowledgments. *Advances in System Reliability Engineering*. 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-815906-4.09998-X
17. Yang W., Zhang B., Wang W., Li CQ. Time-dependent structural reliability under nonstationary

and non-Gaussian processes. *Structural Safety*. 2023; 100:102286. DOI: 10.1016/J. STRUSAFE.2022.102286

18. Krejsa M., Janas P., Krejsa V. Structural reliability analysis using DOProC Method. *Procedia Engineering*. 2016; 142:34-41. DOI: 10.1016/J. PROENG. 2016.02.010

19. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the Problem of Analysis Resistance Bearing Systems in Failure of a Structural Element. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018; 14(3):103-113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113

20. Zhang Z., Jiang C. Evidence-theory-based structural reliability analysis with epistemic uncertainty : a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2021; 63(6):2935-2953. DOI: 10.1007/s00158-021-02863-w

21. Vedyakov I.I., Rayzer V.D. *Reliability of building structures. Theory and calculation*. Moscow, ASV, 2018; 414. EDN: YTYHTE. (rus.).

22. Truong V.H., Kim S.E. Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2018; 121:59-74. DOI: 10.1016/J. ADVENGSOFT.2018.03.006

23. Saad L., Chateaufneuf A., Raphael W. Robust formulation for Reliability-based design optimization of structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018; 57(6):2233-2248. DOI: 10.1007/s00158-017-1853-7

24. Yang M., Zhang D., Han X. New efficient and robust method for structural reliability analysis

and its application in reliability-based design optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020; 366:113018. DOI: 10.1016/j.cma. 2020.113018

25. Kornouhov N.V. *Strength and stability of rod systems: elastic frames, trusses and combined systems*. Moscow, Stroyizdat, 1949; 376. (rus.).

26. Streletsky N.S. *Selected works* / ed. by E.I. Benlenya. Moscow, Stroyizdat, 1975; 423. (rus.).

27. Mushchanov V.P., Orzhekhovskii A.N., Zubenko A.V., Fomenko S.A. Refined methods for calculating and designing engineering structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 2(78):101-115. DOI: 10.18720/MCE.78.8. EDN XPKZTN.

28. Mushchanov V.F., Orzhekhovsky A.N. Numerical methods in assessing the reliability of spatial metal structures of a high level of responsibility. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 106(1):10605. DOI: 10.4123/CUBS.106.05

29. Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. New approaches to assessing the stability of elements of spatial metal structures. *New approaches in assessing the stability of elements of spatial metal structures : collection of materials of the All-Russian Youth Scientific and practical Conference of students, postgraduates and young scientists*. 2022; 196-200. EDN NEWMKM. (rus.).

30. Orzhekhovskiy A., Priadko I., Tanasoglo A., Fomenko S. Design of stadium roofs with a given level of reliability. *Engineering Structures*. 2020; 209:110245. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110245

Received October 4, 2023.

Adopted in revised form on October 20, 2023.

Approved for publication on December 14, 2023.

B I O N O T E S : **Vladimir F. Mushchanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Vice-Rector for Research; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Anatoly N. Orzhekhovskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 3058-6140, Scopus: 85079126906, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Alexander V. Mushchanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Structures; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 4194-7922, ResearcherID: HDO-4425-2022, ORCID: 0000-0002-4381-9476; a.v.mushchanov@donnasa.ru;

Maxim N. Tseplyaev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; PhD (Engineering), lecturer of the department, department of theoretical and applied mechanics; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 5039-9174, Scopus: 57208101665, ORCID: 0000-0002-1729-4127; m.n.ceplyaev@donnasa.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Факторы, влияющие на эффективность самоочищения строительных материалов с фотокаталитически активными компонентами

Полина Игоревна Кийко, Тамара Николаевна Черных,
Валерий Петрович Плесовских

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(ЮУрГУ (НИУ)); г. Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается использование строительных материалов с фотокаталитически активными добавками как перспективное решение экологических и экономических проблем городской среды. В области строительного материаловедения определена необходимость изучения микроструктуры самоочищающихся строительных материалов и влияния примесей на эффективность самоочищения материалов с фотокаталитически активными добавками.

Материалы и методы. Использовали красный гипс (отход производства с фотокаталитически активными примесями), цемент, строительный гипс, микрокремнезем, синтезированную фотокаталитически активную добавку оксид титана – оксид кремния, пигменты на основе железа. Изготовлены образцы-таблетки на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ) с различными фотокаталитически активными компонентами: добавкой-фотокатализатором, пигментами, а также примесные фотокаталитически активные оксиды. Методом электронной растровой микроскопии исследована микроструктура образцов, распределение элементов титана и железа. Эффективность самоочищения определяли по изменению контактного угла капли воды на поверхности, покрытой олеиновой кислотой.

Результаты. Определена эффективность самоочищения образцов с добавленными и примесными фотокаталитически активными компонентами — оксидами титана и железа. Выявлено влияние добавленных примесей на структуру материала, также влияние вида и концентрации примесей на эффективность самоочищения.

Выводы. Добавка-фотокатализатор оксид титана в концентрации 4,4 % обеспечивает высокую эффективность самоочищения, равномерно распределяется в объеме материала, не влияя на структуру формирующегося камня вяжущего. Пигмент (оксид железа (III)) обеспечивает достаточную эффективность самоочищения при концентрации 2–9 %, при концентрациях более 2 % распределяется неравномерно, обеспечивает малый прирост показателей эффективности самоочищения. При совместном введении оксидов титана и железа наблюдается ухудшение самоочищения из-за высокой степени рекомбинации пар электрон – дырка. Красный гипс с примесными оксидами титана и железа показал достаточно высокую эффективность самоочищения, имеет равномерное распределение примесей, которые не оказывают явного влияния на структуру материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: красный гипс, фотокатализатор, самоочищение, оксид титана, оксид железа, гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, анатаз

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кийко П.И., Черных Т.Н., Плесовских В.П. Факторы, влияющие на эффективность самоочищения строительных материалов с фотокаталитически активными компонентами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 778–788. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.778-788

Автор, ответственный за переписку: Тамара Николаевна Черных, chernykhtn@susu.ru.

Factors influencing the efficiency of building materials self-cleaning with photocatalytically active components

Polina I. Kiyko, Tamara N. Chernykh, Valeriy P. Plesovskikh

South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU)); Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The use of building materials with photocatalytically active additives is considered as a promising solution to environmental and economic problems of the urban environment. In the field of building materials science the necessity of studying the microstructure of self-cleaning building materials and the influence of impurities on the efficiency of self-cleaning of materials with photocatalytically active additives is determined.

Materials and methods. Red gypsum (production waste with photocatalytically active impurities), cement, building gypsum, microsilica, synthesized photocatalytically active titanium oxide – silicon oxide additive, and iron-based pigments were used. Tablet specimens of gypsum-cement-pozzolan binder with various photocatalytically active components were made: photocatalyst additive, pigments, photocatalytically active oxide impurities. The microstructure of the specimens and the dis-

tribution of titanium and iron elements were studied using scanning electron microscopy. The efficiency of self-cleaning was determined by the change in the contact angle of a water drop on a surface coated with oleic acid.

Results. The efficiency of self-cleaning of specimens with added and impurity photocatalytically active components was determined. The influence of added impurities on the structure of the material and the influence of the type and concentration of impurities on the efficiency of self-cleaning were revealed.

Conclusions. Titanium oxide photocatalyst additive at a concentration of 4.4 % provides high self-cleaning efficiency, evenly distributed throughout the material without affecting the structure of the forming binder stone. Pigment (iron (III) oxide) provides sufficient self-cleaning efficiency at a concentration of 2–9 %, at concentrations of more than 2 % it is distributed unevenly, providing a small increase in self-cleaning efficiency indicators. With the joint introduction of titanium and iron oxides, deterioration in self-purification is observed due to the high degree of recombination of electron – hole pairs. Red gypsum with impurity oxides of titanium and iron has shown a high efficiency of self-cleaning, has a uniform distribution of impurities that do not have a clear effect on the structure of the material.

KEYWORDS: red gypsum, photocatalyst, self-cleaning, titanium oxide, iron oxide, gypsum-cement-pozzolan binder, anatase

FOR CITATION: Kiyko P.I., Chernykh T.N., Plesovskikh V.P. Factors influencing the efficiency of building materials self-cleaning with photocatalytically active components. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):778-788. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.778-788 (rus.).

Corresponding author: Tamara N. Chernykh, chernykh@susu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Самоочищающиеся материалы сохраняют эстетику внешнего вида поверхности без дополнительных затрат на обслуживание и ремонтные работы. Зачастую такие материалы содержат фотокаталитически активные компоненты, которые при облучении светом (ультрафиолетом, а также светом видимого спектра) запускают процесс фотокатализа, благодаря чему на поверхности материала происходит разложение органических загрязнений. Таким образом, поверхность очищается от пыли, некоторых масел, отходов промышленности и транспорта, также происходит очищение воздушной среды в области фотокаталитически активного материала за счет разложения сложных органических соединений на более простые [1].

Такие материалы полностью отвечают тренду на экологичность и устойчивое развитие городской среды. Кроме того, по мнению международного научного сообщества, использование фотокаталитически активных материалов может помочь в решении экологических проблем и кризиса загрязнения [2].

В настоящее время высокая стоимость фотокаталитически активных добавок и их недостаточная изученность ограничивают распространение самоочищающихся материалов в строительстве. Изучение фотокаталитических процессов на поверхности материала лежит на стыке физики твердого тела, физической химии, фотохимии и строительного материаловедения. При всей сложности изучения ведется большое количество исследований по улучшению эффективности таких добавок, результаты которых позволяют предположить скорое обеспечение экономической доступности добавок-фотокатализаторов и их внедрение в практику строительства.

Наиболее эффективным и распространенным фотокатализатором в настоящее время является оксид титана. Ширина запрещенной зоны оксида титана равна 3,2 эВ, его активация происходит при попадании света длинной волны 390–405 нм.

Основные распространенные модификации оксида титана (рутил и анатаз) обладают фотокаталитической активностью, причем анатаз в большей степени [3]. При использовании оксида титана в качестве фотокатализатора важны правильный выбор его модификаций, определение оптимальных концентраций, высокая удельная поверхность фотокатализатора и его равномерное распределение на поверхности материала [4]. Известно, что большей эффективностью обладает анатазная модификация оксида титана, при этом лучший коммерческий продукт — фотокатализатор Degussa P-25 (производство компании Evonik), представляет собой смесь рутила и анатаза в определенном соотношении. Существует несколько перспективных направлений повышения фотокаталитической эффективности оксида титана. Во-первых, это расширение диапазона длин волн в сторону видимого света, так как ультрафиолетовый свет составляет около 5 % от всего солнечного излучения. Во-вторых, это уменьшение степени рекомбинации пар электрон – дырка, так как фотогенерируемая электронно-дырочная рекомбинация приводит к низкой квантовой эффективности оксида титана. Для реализации этих направлений можно вводить в фотокатализаторы ионы полупроводников для расширения ширины запрещенной зоны или допировать оксид титана благородными металлами для более быстрой миграции электронов и уменьшения степени рекомбинации пар электрон – дырка. В-третьих, это повышение эффективности за счет создания гетероперехода, при котором синтезируют двойные оксиды полупроводников разных типов электронного строения. В-четвертых, использование подложек для осаждения оксида титана имеет несколько положительных влияний на эффективность самоочищения: подложки позволяют добиться более высокой удельной поверхности фотокаталитически активной добавки и лучшего распределения добавки в объеме материала. Самыми изученными и эффективными под-

ложками в настоящее время являются силикатные соединения, в том числе глинистые, так как они обладают большой удельной поверхностью, разной пористостью, достаточной адсорбцией. Помимо обеспечения распределения в структуре материала некоторые подложки способны «притягивать» загрязнения, тем самым улучшая степень самоочищения [2, 5–8].

Химический состав, модификации, физические и фотохимические свойства фотокатализатора являются важными факторами, отвечающими за эффективность самоочищения материалов, но в представленной работе рассматриваются проблемы эффективности фотокатализаторов с точки зрения строительного материаловедения, так как добавка фотокатализатора может не обеспечивать самоочищения при определенных обстоятельствах, связанных с составом и структурой строительного материала.

Основные задачи специалистов и исследователей в области строительного материаловедения — это добиться нужного распределения фотокаталитической добавки, а также минимизировать влияние компонентов вяжущего на работу добавки. Первое решается технологически, а для решения второй задачи необходимо рассмотрение фотокаталитических процессов. Известно, что обычно составы основных строительных вяжущих (цемент и гипс) достаточно нейтральны к фотокаталитическим добавкам и не влияют на процесс фотокатализа [9–15]. Однако в составе материала могут быть и примесные компоненты, например стеклосодержащие примеси, обеспечивающие более эффективное проведение света к фотокатализаторам и уменьшение степени рекомбинации [14]. Присутствие в материале примесей фотокаталитически активных веществ может обеспечить синергетический эффект и улучшить процесс самоочищения, но также может увеличить степень рекомбинации образовавшихся пар электрон – дырка и снизить эффективность фотокаталитических процессов. Повлиять на фотокаталитические процессы также могут компоненты-полупроводники.

Известно, что в плотных материалах в основном вяжущее после затвердевания обеспечивает параметры структуры материала — плотность, пористость, шероховатость поверхности, которые также могут повлиять на результаты самоочищения. Очевидно, что высокая площадь удельной поверхности обеспечит высокую эффективность самоочищения, обычно такой поверхности соответствует средняя шероховатость. При этом размер пор также имеет значение, так как молекулы загрязнителей могут находиться в глубоких порах, куда попадает недостаточное количество света, что препятствует их разложению [16].

Кроме прочего, необходимо изучение эффективности самоочищения цветных строительных

материалов. Многие пигменты, применяемые для окрашивания в строительном материаловедении, содержат соединения-полупроводники, а также железосодержащие соединения [17]. Как известно, многие соединения железа обладают фотокаталитической активностью, соответственно, могут повлиять на эффективность добавок-фотокатализаторов, например, железо эффективно используется для модификации фотокатализаторов на основе оксида титана [18–20].

Для области строительного материаловедения с практической точки зрения интересны также вопросы использования более доступных природных фотокатализаторов, а также возможность использования анатазсодержащих отходов производств, обладающих фотокаталитической активностью. Как известно, природные минералы ильменит и пирит обладают фотокаталитической активностью, обработка природного ильменита, позволяющая регулировать количества и модификации железа и титана, позволяет получить эффективные фотокатализаторы, работающие в видимом диапазоне волн [21–24]. В настоящий момент фотокатализаторы на основе ильменита являются перспективными для применения в области строительного материаловедения [2].

Цель данного исследования — изучить влияние примесных и специально введенных в состав оксидов титана и железа (III) на структуру материала типа гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ) и его самоочищающуюся способность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для эксперимента были изготовлены образцы-таблетки диаметром 1,5 см и толщиной 0,8 см на основе ГЦПВ с использованием следующих материалов: отходы производства оксида титана из ильменита сульфатным способом, коммерческий гипс Г-4 (ООО «Кнауф»), портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ОАО «Уралцемент»), микрокремнезем МКУ-85 (АО «Кузнецкие ферросплавы»).

Методами физико-химического анализа установлено, что основной состав отходов производства оксида титана (в литературе такие отходы обычно называют красным гипсом) включает двухводный гипс 67–80 %, кальцит 7–17 %, оксиды железа 9–23 %, рутил и анатаз 3,9–6,7 %, остальное до 9,1 %. Для красного гипса подобрана оптимальная технология обработки (сушка, обжиг, измельчение) для проявления вяжущих свойств. После обработки красный гипс представляет собой техногенный строительный гипс и соответствует классу Г-4 для гипсовых вяжущих.

В качестве добавок использовали синтезированную фотокаталитически активную добавку $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2$ с доказанной высокой эффективностью [25] (далее — фотокатализатор), пигмент сурик железный (ГОСТ 8135–74) с массовой долей Fe_2O_3 не менее 75 % (далее — пигмент).

Изготовили по 12 образцов-таблеток следующих шести серий:

- серия № 1: бездобавочные образцы из ГЦПВ на основе коммерческого гипса, которые приняты за контрольные, так как состав не содержит фотокаталитически активных примесей и добавок;
- серия № 2: образцы из ГЦПВ на основе красного гипса, который содержит примесные оксиды титана (4,4 %) и железа (III) (9,0 %);
- серия № 3: образцы из ГЦПВ на основе коммерческого гипса с добавкой-фотокатализатором в количестве 4,4 %, что является аналогом состава серии № 2 по содержанию оксида титана;
- серия № 4: образцы из ГЦПВ на основе коммерческого гипса с железосодержащим пигментом в количестве 2,0 % (количество рекомендовано производителем пигментов);
- серия № 5: образцы из ГЦПВ на основе коммерческого гипса с пигментом в количестве 9,0 %, что является аналогом состава серии № 2 по содержанию оксида железа (III);
- серия № 6: образцы из ГЦПВ на основе коммерческого гипса с пигментом в количестве 9,0 % и добавкой фотокатализатором 4,4 %, что является аналогом состава № 2 по содержанию оксида железа (III) и оксида титана.

Составы ГЦПВ для различных серий образцов приведены в таблице. Водовязущее соотношение составляло 0,5 для всех образцов.

Эффективность самоочищения измеряли методом родамин-теста по UNI 1259–2016 и методом

изменения контактного угла согласно ГОСТ Р 57255 на образцах-таблетках после 28 суток твердения при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 40 ± 2 %. При определении эффективности самоочищения для имитации ультрафиолетового света использовали облучатель мощностью $2,1 \pm 0,1$ мВт/см², с длиной волны светодиодов 405 нм и площадью рабочей поверхности 100 см².

Вследствие того, что образцы имели различные цвета от белого до темно-красного, использование метода родамин-теста оказалось неэффективным. Образцы серий № 1 и 3 имеют бело-серый цвет, № 2 — оранжевый, № 4 и 6 — красный, № 5 — светло-красный. Поэтому для оценки эффективности самоочищения был выбран метод изменения контактного угла капли воды на поверхности, покрытой олеиновой кислотой. Данный метод позволяет условно измерить степень разложения органического соединения — олеиновой кислоты на поверхности материала под действием УФ-света. По методу изменения контактного угла, согласно ГОСТ Р 57255, необходимо 200 мкл кислоты налить на материал и распределить от центра к краям на площади не менее (100 ± 2) см² с помощью материала из нерасплетающейся ткани. При таком методе нанесения на образцы из ГЦПВ кислота слишком быстро и неравномерно впитывалась в поверхность материала. Из-за высокой шероховатости и пористости образцов методика была адаптирована так, что кислоту наносили на поверхность капельным способом. В таком случае концентрация кислоты получается в разы

Составы ГЦПВ для различных серий образцов

Compositions of gypsum-cement-pozzolan binder for various series of specimens

Номер серии Series number	Содержание и происхождение оксидов, % Content and origin of oxides, %		Содержание компонентов, % Content of components, %					
	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Коммерческий гипс Commercial gypsum	Красный гипс Red gypsum	Портланд- цемент Cement	Микро- кремнезем Microsilica	Фотока- тализатор Photo- catalyst	Пигмент красный Pigment red
1	0	0	49,7	0,0	35,7	14,5	0,0	0,0
2	4,4 примесь impurity	9,0 примесь impurity	0,0	55,0	32,0	13,0	0,0	0,0
3	4,4 добавка additive	0	47,7	0,0	34,2	13,9	4,2	0,0
4	0	9,0 добавка additive	45,6	0,0	32,7	13,3	0,0	8,4
5	0	2,0 добавка additive	48,8	0,0	35,0	14,2	0,0	2,0
6	4,4 добавка additive	9,0 добавка additive	43,8	0,0	31,5	12,8	3,9	8,1

больше, чем по методу из ГОСТа, следовательно, использовать целевой показатель ГОСТ Р 57255 (способность к самоочищению — разложение не более 80 ч) невозможно. В представленном случае эксперимент проводили для сравнительного анализа самоочищающейся способности образцов и полученные результаты релевантны только внутри описанного эксперимента.

Перед нанесением кислоты измерили исходный контактный угол у всех образцов. Отмечено, что средние значения контактных углов находятся в узком диапазоне 28–30°, что говорит о похожей структуре поверхности всех образцов, близких значениях шероховатости и открытой пористости. После первого измерения образцы находились 12 ч при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $40 \pm 2\%$ до высыхания воды, нанесенной на поверхность. Кислоту наносили на подготовленные образцы капельным способом, концентрация олеиновой кислоты при нанесении капельным способом на образцы-таблетки составила $0,055\text{ г/см}^2$. Были зафиксированы контактные углы при заданной концентрации кислоты, после измерения образцы находились 12 ч в полной темноте при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $40 \pm 2\%$ до высыхания нанесенной воды с поверхности. Далее образцы поместили под лампу, измерения контактных углов проводили каждые 6 ч облучения и закончили по истечении суммарно 50 ч облучения, когда средние значения двух последних измерений отличались менее чем на 10%. Для измерения растекания каждой капли было снято видео продолжительностью не менее 60 сек с частотой пять кадров в секунду с момента падения капли до полной остановки растекания, далее углы были определены на стоп-кадре с помощью программного обеспечения Autocad.

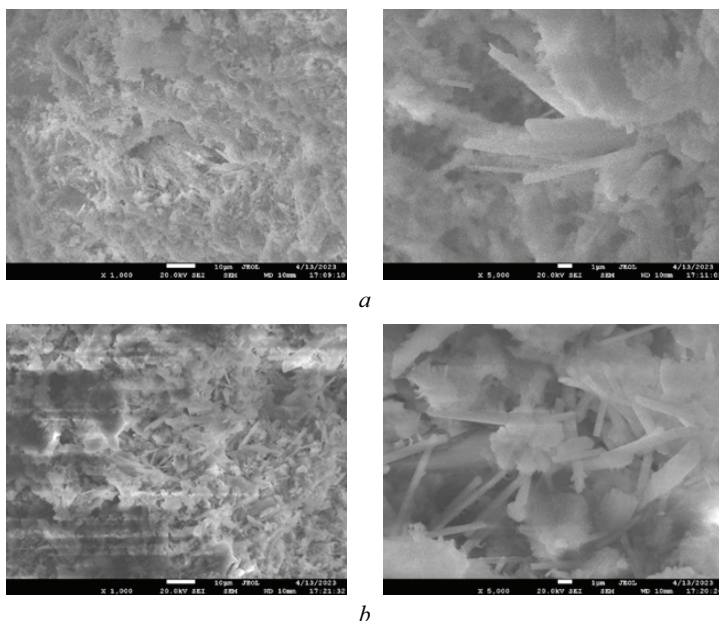
Также для более полного понимания работы фотокаталитически активных примесей в материале с помощью анализа вторичного рентгеновского излучения исследовали распределение химических элементов по участку образцов, исследование проведено на растровом (сканирующем) электронном микроскопе (РЭМ) JSM-7001F (JEOL, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1, *a–f* приведены микрофотографии структуры затвердевшего камня вяжущего (ГЦПВ) образцов из всех серий.

Микроструктура образцов сходна по морфологии составляющих образований. Элементы гипса (Ca, S, O) ассоциированы у всех образцов, но не совпадают полностью, так как часть кальция и кислорода связаны в гидросиликаты кальция. На микрофотографиях образцов (рис. 1, *a–c*) в основном видны кристаллы гипса в виде игольчатых форм и классической формы «ласточкин хвост». При этом у образцов с добавленным железосодержащим пигментом структура немного меняется, становится меньше «игольчатых» форм и больше «бочонков». Таким образом, добавление оксида титана в исследуемых дозировках не оказывает значительного влияния на структуру формирующегося камня из ГЦПВ, а оксид железа (III) приводит к некоторому изменению морфологии новообразований. Вероятно, введенные оксиды железа (III) выступают кристаллическими затравками, поэтому гипсовые соединения изменяют свой габитус с игольчатого на столбчатый.

Титан по результатам электронной микроскопии хорошо определяется у образцов серий № 2, 3, 6 (рис. 2). У образца на основе красного гипса (рис. 2, *a*)



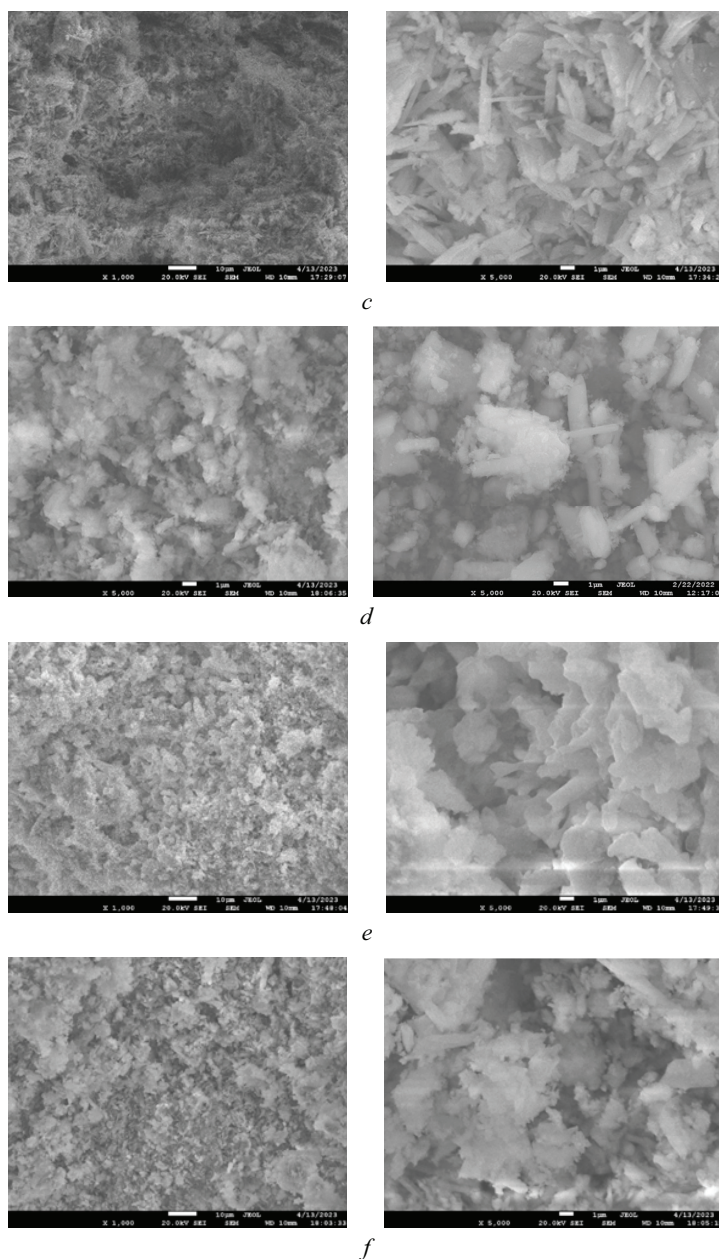


Рис. 1. Микрофотографии образцов различных серий в масштабе $\times 1000$, $\times 5000$: *a* — серия № 1; *b* — серия № 2; *c* — серия № 3; *d* — серия № 4; *e* — серия № 5; *f* — серия № 6

Fig. 1. Microphotographs of specimens of different series in scale of $\times 1,000$, $\times 5,000$: *a* — series No. 1; *b* — series No. 2; *c* — series No. 3; *d* — series No. 4; *e* — series No. 5; *f* — series No. 6

менее равномерное распределение и более выраженные центры агломерации.

Железо по результатам электронной микроскопии хорошо определяется в образцах серий № 2, 4, 5, 6 (рис. 3). При содержании пигмента 2 % (рис. 3, *b*) железо распространено равномерно, а при концентрации 9 % (рис. 3, *a*, *c*) появляются крупные центры агломерации. Отмечено, что в присутствии добавленного оксида титана распределение железа в больших концентрациях заметно улучшается (рис. 3, *c*).

Результаты определения эффективности самоочищения по методу контактного угла приведены в виде диаграммы на рис. 4.

Все образцы с фотокаталитически активными добавками показывают повышенную эффективность самоочищения по сравнению с контрольным образцом. Чем меньше контактный угол, тем больше эффективность самоочищения, т.е. больше oleиновой кислоты подверглось разложению на поверхности образцов. Наиболее эффективен, ожидаемо, образец с фотокатализатором. При этом образец на основе отходов с примесями оксидов титана и железа (III) показывает также достаточно высокую эффективность самоочищения.

Интересны результаты образцов с добавленным оксидом железа (III) — пигментом, они все по-

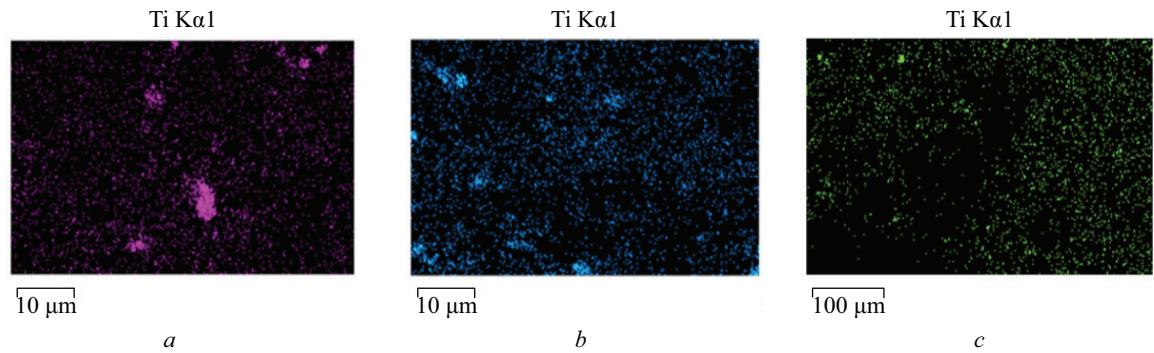


Рис. 2. Карты распределения титана: *a* — серия № 2; *b* — серия № 3; *c* — серия № 4

Fig. 2. Titanium distribution maps: *a* — series No. 2; *b* — series No. 3; *c* — series No. 4

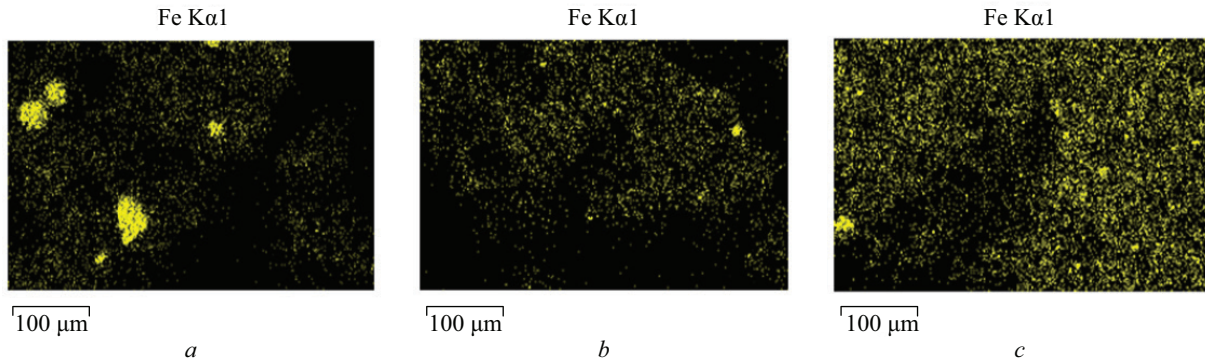


Рис. 3. Карты распределения железа: *a* — серия № 4; *b* — серия № 5; *c* — серия № 6

Fig. 3. Iron distribution maps: *a* — series No. 4; *b* — series No. 5; *c* — series No. 6

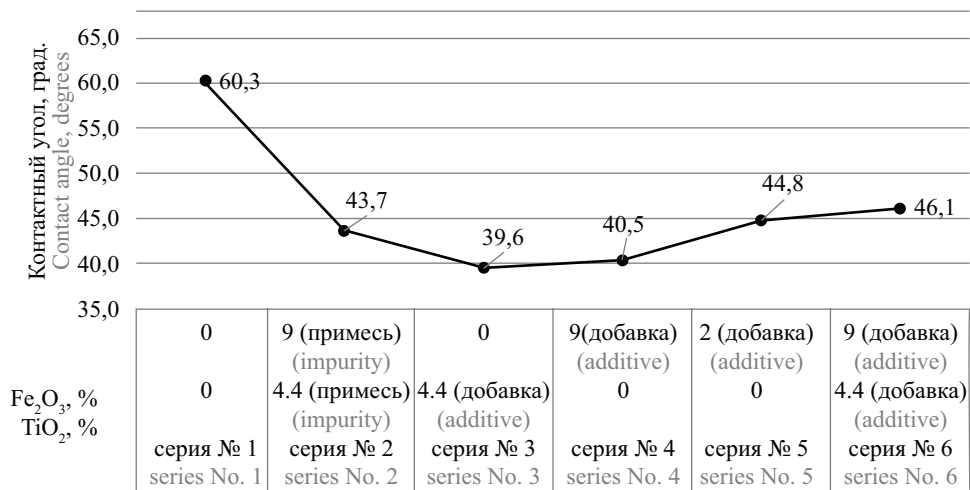


Рис. 4. Результаты измерения контактного угла после УФ-облучения в течение 50 ч

Fig. 4. Contact angle measurement results after UV irradiation for 50 hours

казывают довольно высокую эффективность самоочистки. У образцов № 4 и 5 численный результат контактного угла различается немного, хотя дозировка образца № 4 значительно больше. Как видно было по картам распределения, железо при дозировке 9 % сильно агломерировалось, не наблюдалось равномерного распределения. Вероятно, это и есть причина небольшого увеличения эффективности при значительном увеличении количества добавки пигмента.

Образцы серии № 6 имеют большое количество равномерно распределенного оксида железа (III) в составе при одновременном наличии в составе оксида титана, но эффективность самоочистки у образцов этой серии ниже, чем у образцов только с титаном или только с железом в тех же концентрациях. Вероятно, это можно объяснить высокой степенью рекомбинации образовавшихся пар электрон – дырка, а следовательно, низкой степенью разложения частиц на поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами электронной микроскопии и изменения контактного угла смачивания исследовано влияние примесных и специально введенных в состав оксидов титана и железа (III) на структуру материала типа ГЦПВ и его самоочищающуюся способность. Отмечено, что при введении добавки оксида титана в состав ГЦПВ в концентрации до 4,4 % отсутствует заметное влияние на структуру материала. При этом введение оксида железа (III) в концентрациях от 2 до 9 % приводит к изменению морфологии кристаллитов гипса. При больших дозировках наблюдается неравномерное распределение железа в объеме материала.

Методом изменения контактного угла смачивания доказана фотокаталитическая активность оксидов титана и железа (III) и их эффективность как в примесном виде, так и в виде специально введенных добавок. Наиболее высокую эффективность самоочищения материалам придает синтезированный оксид титана. Оксиды железа (III) обладают меньшей фотокаталитической активностью. При этом увеличение концентрации оксида железа (III) в материале более 2 % незначительно увеличивает эффективность самоочищения из-за неравномерного распределения добавки в объеме. При совместном

введении оксидов железа (III) и титана наблюдается снижение фотокаталитической активности при достаточно равномерном распределении добавок, что вероятно связано с увеличением степени рекомбинации (при попадании света на композит с оксидами железа и титана образуются пары электрон – дырка у обоих соединений, но в присутствии друг друга усиливается степень рекомбинации этих пар, соответственно, снижается эффективность самоочищения).

Доказана возможность использования отходов производства оксида титана (красного гипса, содержащего примесные оксиды титана и железа (III)) как фотокаталитически активного компонента для самоочищающихся материалов. Отмечено, что у материала на основе красного гипса меньшая эффективность самоочищения, чем у материала с добавленным фотокатализатором, что вероятно объясняется большей дисперсностью и равномерностью распределения добавки-фотокатализатора. Применение фотокаталитически активных компонентов в правильно подобранной комбинации для создания эффективных самоочищающихся материалов представляется перспективным научным и практическим направлением в развитии строительного материаловедения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Артемьев Ю.М., Рябчук В.К.* Введение в гетерогенный фотокатализ. СПб.: 1999. 303 с.
2. *Li X., Simon U., Bekheet M.F., Gurlo A.* Mineral-supported photocatalysts: a review of materials, mechanisms and environmental applications // *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 15. P. 5607. DOI: 10.3390/en15155607
3. *Cundari T.R.* Titanium chemistry // *Computational Organometallic Chemistry*. 2014. 448 p. DOI: 10.1201/9781482290073
4. *Paolini R., Borroni D., Pedferri M., Diamanti M.V.* Self-cleaning building materials: The multifaceted effects of titanium dioxide // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 182. Pp. 126–133. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.047
5. *Gubareva E.N., Strokova V.V., Ogurtsova Y.N., Baskakov P.S., Singh L.P.* Composition and properties of TiO₂ sol to produce a photocatalytic composite material // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 854. Pp. 45–50. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.854.45
6. *Kumar S.G., Devi L.G.* Review on modified TiO₂ photocatalysis under UV/Visible light: selected results and related mechanisms on interfacial charge carrier transfer dynamics // *Journal of Physical Chemistry A*. 2011. Vol. 115. Pp. 13211–13241. DOI: 10.1021/jp204364a
7. *Rapsomanikis A., Papoulis D., Panagiotaras D., Kaplani E., Stathatos E.* Nanocrystalline TiO₂ and hal-

- loysite clay mineral composite films prepared by sol-gel method: synergistic effect and the case of silver modification to the photocatalytic degradation of basic blue-41 Azo Dye in water // *Global Nest Journal*. 2014. Vol. 16. Issue 3. Pp. 485–498. DOI: 10.30955/gnj.001323
8. *Smirnova O.V., Grebenyuk A.G., Lobanov V.V.* A quantum chemical study on the effect of titanium dioxide modification with non-metals on its spectral characteristics // *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni*. 2020. Vol. 11. Issue 4. Pp. 539–546. DOI: 10.15407/hftp11.04.539
9. *Diamanti M.V., Luongo N., Massari S., Lupica Spagnolo S., Daniotti B., Pedferri M.P.* Durability of self-cleaning cement-based materials // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 280. P. 122442. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122442
10. *Hamidi F., Aslani F.* TiO₂-based photocatalytic cementitious composites: materials, properties, influential parameters, and assessment techniques // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9. Issue 10. P. 1444. DOI: 10.3390/nano9101444
11. *Janus M., Bubacz K., Zatorska J., Kusiak-Nejman E., Czyżewski A., Morawski A.W.* Preliminary studies of photocatalytic activity of gypsum plasters containing TiO₂ co-modified with nitrogen and carbon // *Polish Journal of Chemical Technology*. 2015. Vol. 17. Issue 2. Pp. 96–102. DOI: 10.1515/pjct-2015-0036

12. Lapidus A., Korolev E., Topchiy D., Kuzmina T., Shekhovtsova S., Shestakov N. Self-cleaning cement-based building materials // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 606. DOI: 10.3390/buildings12050606
13. Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Lukmanova L. Influence of active mineral additives on the basic properties of the gypsum cementpozzolan binder for the manufacture of building products // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 106. P. 03012. DOI: 10.1051/mateconf/201710603012
14. Zajac K., Janus M., Morawski A. Improved self-cleaning properties of photocatalytic gypsum plaster enriched with glass fiber // *Materials*. 2019. Vol. 12. Issue 3. P. 357. DOI: 10.3390/ma12030357
15. Zhao A., Yang J., Yang E.-H. Self-cleaning engineered cementitious composites // *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 64. Pp. 74–83. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.09.007
16. Jimenez-Relinque E., Rodriguez-Garcia J.R., Castillo A., Castellote M. Characteristics and efficiency of photocatalytic cementitious materials: Type of binder, roughness and microstructure // *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 71. Pp. 124–131. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.02.003
17. Лабузова М.В., Балицкий Д.А., Огурцова Ю.Н. Определение влияния неорганического пигмента на процесс самоочистки цементных образцов с диоксидом титана // IX Международный Молодежный Форум “Образование. Наука. Производство”: сб. тр. конф. Белгород. 2017. С. 761–764. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37149150>
18. Huang C., Hsieh W., Pan J., Chang S. Characteristic of an innovative TiO_2/Fe_0 composite for treatment of Azo Dye // *Separation and Purification Technology*. 2007. Vol. 58. Issue 1. Pp. 152–158. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.07.034
19. Lezner M., Grabowska E., Zaleska A. Preparation and photocatalytic activity of iron-modified titanium dioxide photocatalyst // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2012. Vol. 48. Issue 1. Pp. 193–200.
20. Pal B., Sharon M., Nogami G. Preparation and characterization of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ binary mixed oxides and its photocatalytic properties // *Materials Chemistry and Physics*. 1999. Vol. 59. Issue 3. Pp. 254–261. DOI: 10.1016/S0254-0584(99)00071-1
21. García-Muñoz P., Pliego G., Zazo J.A., Bahamonde A., Casas J.A. Ilmenite (FeTiO_3) as low cost catalyst for advanced oxidation processes // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016. Vol. 4. Issue 1. Pp. 542–548. DOI: 10.1016/j.jece.2015.11.037
22. Sariman S., Krisnandi Y.K., Setiawan B. Anatase TiO_2 Enrichment from Bangka ilmenite (FeTiO_3) and Its photocatalytic test on degradation of Congo red // *Proceedings of the Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 789. Pp. 538–544. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.789.538
23. Smith Y.R., Joseph A.R.K., (Ravi) Subramanian V., Viswanathan B. Sulfated $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ synthesized from ilmenite ore: A visible light active photocatalyst // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. Vol. 367. Issue 1-3. Pp. 140–147. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.07.001
24. Torres-Luna J.A., Sanabria N.R., Carriazo J.G. Powders of iron(III)-doped titanium dioxide obtained by direct way from a natural ilmenite // *Powder Technology*. 2016. Vol. 302. Pp. 254–260. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.08.056
25. Avdin V.V., Bulanova A.V., Asilbekova A.A., Ilkaeva M.V. Destruction of some dyes on composite photocatalysts based on $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ Oxides // *Bulletin of the South Ural State University series “Chemistry”*. 2020. Vol. 12. Pp. 98–107. DOI: 10.14529/chem200305.

Поступила в редакцию 15 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 6 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Полина Игоревна Кийко — инженер-исследователь кафедры строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1158227, Scopus: 57213815658; mspolly22@mail.ru;

Тамара Николаевна Черных — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных материалов и изделий; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 4731125, Scopus: 6508381737, Researcher ID: K-8568-2014, ORCID: 0000-0002-4288-2115; chernykhnt@susu.ru;

Валерий Петрович Плесовских — студент архитектурно-строительного института; **Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; plessovvp@gmail.com.

Вклад авторов:

Кийко П.И. — концепция исследования, написание статьи, сбор материала, обработка материала.

Черных Т.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Плесовских В.П. — сбор материала, обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Artem'ev Ju.M., Rjabchuk V.K. *Introduction to heterogeneous photocatalysis*. Saint Petersburg, 1999; 303. (rus.).
2. Li X., Simon U., Bekheet M.F., Gurlo A. Mineral-supported photocatalysts: a review of materials, mechanisms and environmental applications. *Energies*. 2022; 15(15):5607. DOI: 10.3390/en15155607
3. Cundari T.R. Titanium chemistry. *Computational Organometallic Chemistry*. 2014; 448. DOI: 10.1201/9781482290073
4. Paolini R., Borroni D., Pedferri M., Diamanti M.V. Self-cleaning building materials: The multifaceted effects of titanium dioxide. *Construction and Building Materials*. 2018; 182:126-133. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.047.
5. Gubareva E.N., Strokova V.V., Ogurtsova Y.N., Baskakov P.S., Singh L.P. Composition and properties of TiO₂ Sol to produce a photocatalytic composite material. *Key Engineering Materials*. 2020; 854:45-50. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.854.45
6. Kumar S.G., Devi L.G. Review on modified TiO₂ photocatalysis under UV/visible light: selected results and related mechanisms on interfacial charge carrier transfer dynamics. *Journal of Physical Chemistry A*. 2011; 115:13211-13241. DOI: 10.1021/jp204364a
7. Rapsomanikis A., Papoulis D., Panagiotaras D., Kaplani E., Stathatos E. Nanocrystalline TiO₂ and halloysite clay mineral composite films prepared by sol-gel method: synergistic effect and the case of silver modification to the photocatalytic degradation of basic blue-41 azo dye in water. *Global Nest Journal*. 2014; 16(3):485-498. DOI: 10.30955/gnj.001323
8. Smirnova O.V., Grebenyuk A.G., Lobanov V.V. A quantum chemical study on the effect of titanium dioxide modification with non-metals on its spectral characteristics. *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhnosti*. 2020; 11(4):539-546. DOI: 10.15407/hftp11.04.539
9. Diamanti M.V., Luongo N., Massari S., Lupica Spagnolo S., Daniotti B., Pedferri M.P. Durability of self-cleaning cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2021; 280:122442. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122442
10. Hamidi F., Aslani F. TiO₂-based photocatalytic cementitious composites: materials, properties, influential parameters, and assessment techniques. *Nanomaterials*. 2019; 9(10):1444. DOI: 10.3390/nano9101444
11. Janus M., Bubacz K., Zatorska J., Kusiak-Nejman E., Czyżewski A., Morawski A.W. Preliminary studies of photocatalytic activity of gypsum plasters containing TiO₂ co-modified with nitrogen and carbon. *Polish Journal of Chemical Technology*. 2015; 17(2):96-102. DOI: 10.1515/pjct-2015-0036
12. Lapidus A., Korolev E., Topchiiy D., Kuzmina T., Shekhovtsova S., Shestakov N. Self-cleaning cement-based building materials. *Buildings*. 2022; 12(5):606. DOI: 10.3390/buildings12050606
13. Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Lukmanova L. Influence of active mineral additives on the basic properties of the gypsum cementpozzolan binder for the manufacture of building products. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:03012. DOI: 10.1051/mateconf/201710603012
14. Zając K., Janus M., Morawski A. Improved self-cleaning properties of photocatalytic gypsum plaster enriched with glass fiber. *Materials*. 2019; 12(3):357. DOI: 10.3390/ma12030357
15. Zhao A., Yang J., Yang E.-H. Self-cleaning engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2015; 64:74-83. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.09.007
16. Jimenez-Relinque E., Rodriguez-Garcia J.R., Castillo A., Castellote M. Characteristics and efficiency of photocatalytic cementitious materials: Type of binder, roughness and microstructure. *Cement and Concrete Research*. 2015; 71:124-131. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.02.003
17. Labuzova M.V., Balitskiy D.A., Ogurtsova Yu.N. Determination of the influence of inorganic pigment on the self-cleaning process of cement compounds samples with titanium dioxide. *IX International Youth Forum "Education. The science. Production": collection of conference proceedings*. Belgorod. 2017; 761-764. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37149150> (rus.).
18. Huang C., Hsieh W., Pan J., Chang S. Characteristic of an innovative TiO₂/Fe₃O₄ composite for treatment of Azo Dye. *Separation and Purification Technology*. 2007; 58(1):152-158. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.07.034
19. Lezner M., Grabowska E., Zaleska A. Preparation and photocatalytic activity of iron-modified titanium dioxide photocatalyst. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2012; 48(1):193-200.
20. Pal B., Sharon M., Nogami G. Preparation and characterization of TiO₂/Fe₂O₃ binary mixed oxides and its photocatalytic properties. *Materials Chemistry and Physics*. 1999; 59(3):254-261. DOI: 10.1016/s0254-0584(99)00071-1
21. García-Muñoz P., Pliego G., Zazo J.A., Bahamonde A., Casas J.A. Ilmenite (FeTiO₃) as low cost catalyst for advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016; 4(1):542-548. DOI: 10.1016/j.jece.2015.11.037
22. Sariman S., Krisnandi Y.K., Setiawan B. Anatase TiO₂ Enrichment from bangka ilmenite (FeTiO₃) and Its photocatalytic test on degradation of congo red. *Proceedings of the Advanced Materials Research*. 2013; 789:538-544. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.789.538
23. Smith Y.R., Joseph A.R.K., (Ravi) Subramanian V., Viswanathan B. Sulfated Fe₂O₃-TiO₂ synthe-

sized from ilmenite ore: A visible light active photocatalyst. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010; 367(1-3):140-147. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.07.001

24. Torres-Luna J.A., Sanabria N.R., Carriazo J.G. Powders of iron(III)-doped titanium dioxide obtained by direct way from a natural ilmenite. *Powder Tech-*

nology. 2016; 302:254-260. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.08.056

25. Avdin V.V., Bulanova A.V., Asilbekova A.A., Ilkaeva M.V. Destruction of some dyes on composite photocatalysts based on SiO₂/TiO₂ Oxides. *Bulletin of the South Ural State University series "Chemistry"*. 2020; 12:98-107. DOI: 10.14529/chem200305

Received September 15, 2023.

Adopted in revised form on September 17, 2023.

Approved for publication on October 6, 2023.

BIONOTES: **Polina I. Kiyko** — research engineer of the Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 1158227, Scopus: 57213815658; mspolly22@mail.ru;

Tamara N. Chernykh — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Materials and Products; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 4731125, Scopus: 6508381737, ResearcherID: K-8568-2014, ORCID: 0000-0002-4288-2115; chernykhnt@susu.ru;

Valeriy P. Plesovskikh — student of the Institute of Architecture and Civil Engineering; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (NRU))**; 76 Lenina prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; plessovpv@gmail.com.

Contribution of the authors:

Polina I. Kiyko — concept of research, article writing, research, illustrations.

Tamara N. Chernykh — scientific management, scientific text editing.

Valeriy P. Plesovskikh — research, illustrations.

The authors declare no conflict of interest.

Несущая способность и осадки глинистых оснований
при блочных циклических нагружениях

Илизар Талгатович Мирсаяпов, Хани Мохаммед Абдо Шараф
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Имеющиеся методики оценки несущей способности по деформациям оснований в основном учитывают единичные статические нагрузки небольшой длительности или циклические нагрузки с неизменными значениями на протяжении всего периода эксплуатации. Практически не изучено влияние нестационарных циклических нагрузок на поведение грунтов глинистого основания. Исследования выполнены для разработки метода расчета осадки несущей способности глинистых оснований при блочных циклических нагружениях.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования глинистых оснований в устройствах трехосного сжатия кубической и призматической формы и лотковых испытаний, а также теоретические исследования по определению осадки и несущей способности глинистых оснований при воздействии различных режимов нагружения.

Результаты. На основе существующего расчета базовой несущей способности и осадок, а также изучения поведения глинистого грунта при циклических нагрузках получено уравнение в компактной форме, которое позволяет учитывать характеристики деформации глинистого грунта, значительно снижая сложность и точность расчета. Используемая разработка методов расчета несущей способности и осадки глинистых оснований при блочных циклических нагрузках находится на достаточно высоком уровне.

Выводы. Предложен новый подход к оценке несущей способности глинистых оснований при блочных циклических нагрузках, разработан инженерный метод расчета осадок глинистых оснований. Этот метод основан на использовании метода послойного суммирования и учитывает изменение пространственного напряженно-деформированного состояния и механических свойств грунтов в процессе блочного циклического нагружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несущая способность глинистых грунтов, осадка, блочное циклическое нагружение, режим нагружения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мирсаяпов И.Т., Шараф Х.М.А. Несущая способность и осадки глинистых оснований при блочных циклических нагружениях // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 789–799. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799

Автор, ответственный за переписку: Хани Мохаммед Абдо Шараф, hani_2012@mail.ru.

Bearing capacity and settlement of clay foundations
under block cyclic loading

Ilizar T. Mirsayapov, Hani Mohammed Abdo Sharaf
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The available methods of assessment of bearing capacity by deformations of foundations mainly take into account single static loads of short duration or cyclic loads with unchanged values during the whole period of operation. The effect of cyclic loading of non-stationary regimes on the behavior of soil bases is practically not studied. In this connection, the research was carried out to develop a method for calculating the settlement of the bearing capacity of clay foundations under block cyclic loading.

Materials and methods. To achieve the purpose of this paper, experimental studies of clay foundations in triaxial compression and tray test devices, as well as theoretical studies to determine the bearing capacity and settlement of clay foundations under different loading regimes were carried out.

Results. On the basis of existing calculations of bearing capacity and settlement of foundations and the study of the behavior of clay soils under cyclic loads, the equations in compact form are obtained, which make it possible to take into account the peculiarities of deformation of clay soils significantly reducing the complexity and accuracy of the calculations. The development of methods for calculating the bearing capacity and settlement of clay foundations under block cyclic loads is at a sufficiently high level.

Conclusions. A method for calculating the bearing capacity of clay foundations under block cyclic loading is proposed and an engineering method for calculating the settlement of clay foundations is developed, based on the method of layer-by-layer summation, which takes into account the simultaneous change in the spatial stress-strain state and mechanical characteristics of soils in the process of mode block cyclic loading.

KEYWORDS: bearing capacity, clay soils, settlement, block cyclic loading, loading regime**FOR CITATION:** Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Bearing capacity and settlement of clay foundations under block cyclic loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):789-799. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799 (rus.).*Corresponding author:* Hani Mohammed Abdo Sharaf, hani_2012@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Циклические нагрузки имеют практическое значение для решения многих задач инженерной геотехники. Некоторые примеры циклических нагрузок не эндогенного характера [1, 2]. Циклическая нагрузка может быть вызвана движением транспорта (скоростные поезда, поезда с магнитной левитацией), промышленными источниками (рельсы кранов, фундаменты машин), ветром и волнами (береговые и вне береговые ветрогенераторы, береговые сооружения) или повторяющимися процессами наполнения и опорожнения (шлюзы, резервуары и силосные ямы) [3–5]. Кроме того, циклические нагрузки в грунте вызывают строительные процессы (например, вибрация шпунтовых свай) и механическое уплотнение (например, виброуплотнение) [6, 7]. Циклическая нагрузка может быть обусловлена и эндогенными источниками. К примеру, землетрясения приводят к распространению сдвиговых волн в грунте, вызывающих циклическое поведение [8–10]. Основная тема инженерной геотехники — поведение грунта, связанное с фундаментом. Предельная несущая способность, связанная с фундаментом, рассматривается инженерами-геотехниками и исследователями как сложная задача. Собственный вес конструкции, а также приложенная нагрузка, включая циклическую, должны быть экономично и безопасно переданы на грунт [11–13]. Предельная несущая способность фундамента может быть определена как нагрузка, при которой происходит разрушение сдвига, связанное с грунтом под фундаментом. До настоящего времени было проведено большое количество численных и экспериментальных исследований для установления несущей способности фундаментов на глинистых грунтах [14–16]. В большинстве случаев расчеты несущей способности оснований фундаментов оценивались с помощью традиционной теории, в которой использовались коэффициенты несущей способности. Также в анализе применялась теория упругости, в которой грунт считался жестким, однородным и изотропным для упрощения инженерно-геологической практики [17–19]. Однако грунты имеют различные пласты в земле, они не являются слоистыми грунтами с различной глубиной залегания и обладают разными свойствами. Следовательно, учет воздействия режимного блочного циклического нагружения и его последствий играет важную роль в геотехнических проектах, где поведение глинистых грунтов при циклическом нагружении — главная проблема [20, 21]. Таким образом, возникает вопрос

о необходимости разработки метода расчета осадки и несущей способности глинистых оснований при режимном блочном циклическом нагружении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения механических свойств грунтов выполняется ряд испытаний. Известные методики связаны с работами профессора И.Т. Мирсаяпова, его учеников и др. Анализ возможностей известных устройств для циклических испытаний привел к идее разработки устройства, позволяющего определять механические свойства в зависимости от циклической нагрузки. Выбор вида нагрузки был сделан на основе анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта при циклическом воздействии. Грунты в природе подвергаются многокомпонентному воздействию, причем направление главных напряжений в процессе нагружения непостоянно. Для изучения влияния режима нагружения и вида напряженного состояния на прочностные и деформационные свойства глинистых оснований проведены экспериментальные исследования в устройствах трехосного сжатия и лотковых испытаний в режиме блочного циклического нагружения [22, 23]. Экспериментальные исследования выполнены по программе, представленной на рис. 1.

Для учета влияния режимного нагружения на глинистые основания были приняты режимы нагружения, приведенные на рис. 2.

В качестве грунта для испытаний использовалась полутвердая глина. Этот материал обладает следующими характеристиками: $\rho = 1,9 \text{ г/см}^3$; $W = 23 \%$; $W_L = 38 \%$; $W_p = 21 \%$; число пластичности $J_p = 0,17 \text{ д. ед.}$; $J_L = 0,117 \text{ д. ед.}$; $j = 20 \text{ град.}$; $C = 63 \text{ кПа}$.

Методика проведения экспериментальных исследований и процедура подготовки грунтового основания разработаны на кафедре оснований фундаментов динамики и инженерной геологии КГАСУ профессором И.Т. Мирсаяповым и его учениками [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реакция грунтов на циклические нагрузки в значительной степени определяется механическими свойствами грунта, при этом уровень реакции на деформацию зависит от прочности и демпфирования. Более того, при высоких уровнях деформации, помимо уровня деформации, необходимо учитывать и другие параметры, такие как скорость и количество циклов, скорость и количество циклов

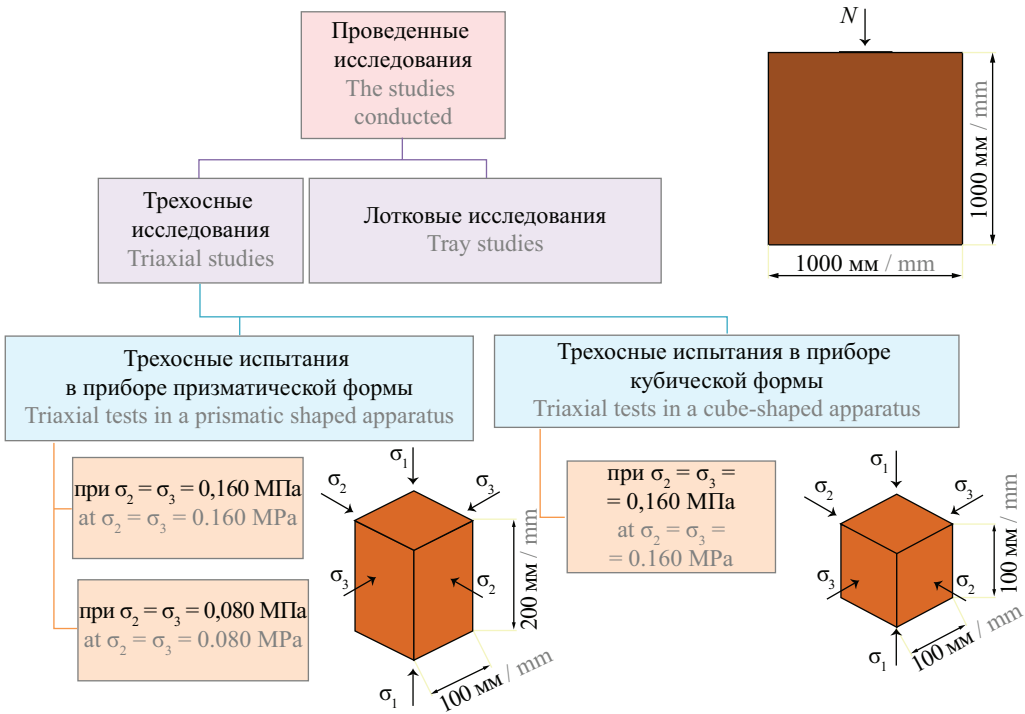


Рис. 1. Схема программы экспериментальных исследований
Fig. 1. Scheme of the experimental research programme

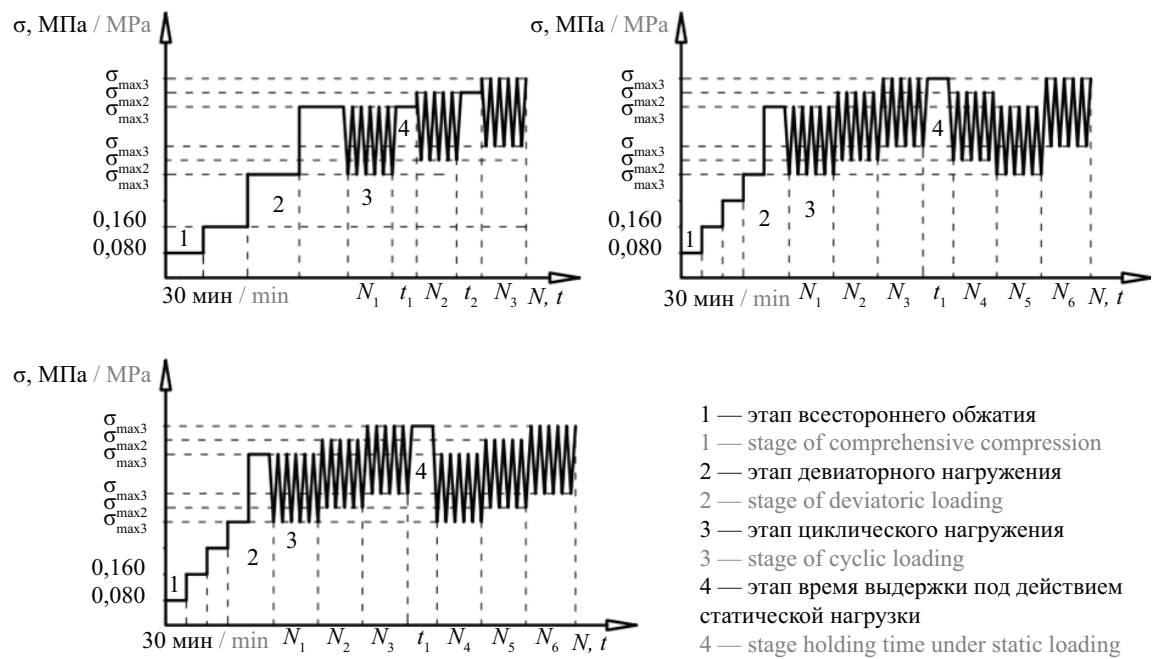


Рис. 2. Режимы нагружения: N — количество циклов; t — время выдержки
Fig. 2. Loading regimes: N — number of cycles; t — holding time

циклического нагружения; также оказывает существенное влияние на прочность грунта скорость деформации грунтов под действием циклической нагрузки (в основном для глинистых грунтов) [25]. В ходе испытаний в режиме трехосного блочно-циклического нагружения выявлены особенности закономерности, строения и характера разрушения образцов грунтов, состоящие из следующих компо-

нентов: при увеличении и уменьшении величины нагрузки, числа циклов нагружения на протяжении выдержки образуются замкнутые зоны пирамидальной формы в верхней части образца и его боковых поверхностях (рис. 3). Размеры этих сжатых пирамидок могут быть разными в зависимости от режима нагружения. Поскольку эти пирамидки перемещаются как твер-

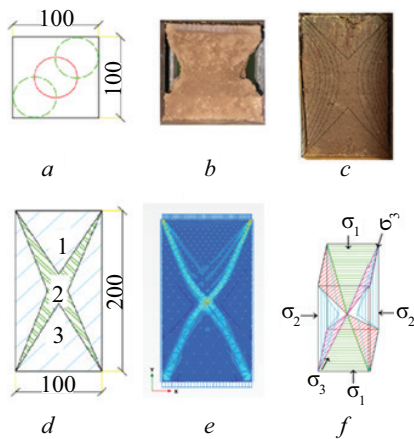


Рис. 3. Вид схемы разрушения образцов испытаний: *a, b* — схема зон разной плотности в образце при трехосном испытании; *c* — при длительно статической нагрузке кубической формы согласно И.В. Королевой [26]; *d* — при режимной блочной циклической нагрузке призматической формы; *e* — при статической нагрузке призматической формы Plaxis 20v; *f* — схема напряженного состояния призматической формы; 1 — верхняя зона упрочнения; 2 — зона разупрочнения; 3 — нижняя зона упрочнения

Fig. 3. Fracture pattern of a soil specimen after tests; *a, b* — scheme of a local zone of different density in a specimen under triaxial testing; *c* — under long-term static loading of a cubic form according to I.V. Koroleva [26]; *d* — under block-cyclic loading of a prismatic form; *e* — under static loading of a Plaxis 20v prismatic form; *f* — scheme of a stressed state of a prismatic form); 1 — upper hardening zone; 2 — unstrengthening zone; 3 — lower hardening zone

дое тело, то происходит деформация образца. При этом массивные пирамиды формируют грунт с более плотной структурой, в межпирамидных зонах происходит сдвиг и образование отрывов, что сопровождается появлением мелких трещин. Факт образования отрыва и сдвига подтвержда-

ется резким возрастанием величины деформаций и возникновением характера звука растрескивания. При исследовании влияния напряженного пространственного состояния на физические свойства грунта из характеризующей зоны после разрушения образца были отобраны пробы [27].

Полученные характерные признаки разрушения образца в наблюдаемых зонах отбора образцов грунта различных плотностей отличаются от начальных значений. Это свидетельствует о различной степени разрушения грунта в этих зонах. На 6–10 % возросла плотность грунта в зоне № 1, в зоне № 2 на 1–3 % и в зоне № 3 на 3–5 %, а также во всех трех случаях при циклическом нагружении. Согласно результатам исследований, после проведения испытаний плотность образца снизилась на 3–6 % по сравнению с первоначальной плотностью. В условиях повторяющегося циклического нагружения снижается влажность до 7 %.

При рассмотрении циклических деформаций ползучести и прочностных характеристик грунта при режимном последовательном нагружении следует учитывать влияние вертикального давления предыдущего блока σ_1 на прочностные и деформационные характеристики каждого последующего цикла (рис. 4).

Несущая способность глинистого грунта при блочном циклическом нагружении

Фундаменты являются важнейшим элементом конструкций, поскольку они надежно передают нагрузку с поверхности на подстилающую грунтовую среду, не допуская разрушения ни грунтовой среды, ни фундамента. Поэтому важно оценить несущую способность грунтового массива. Многие геотехнические исследователи проявляли интерес к теме разрушения несущей способности как в прошлом, так и в настоящее время [28]. Чрезмерная осадка

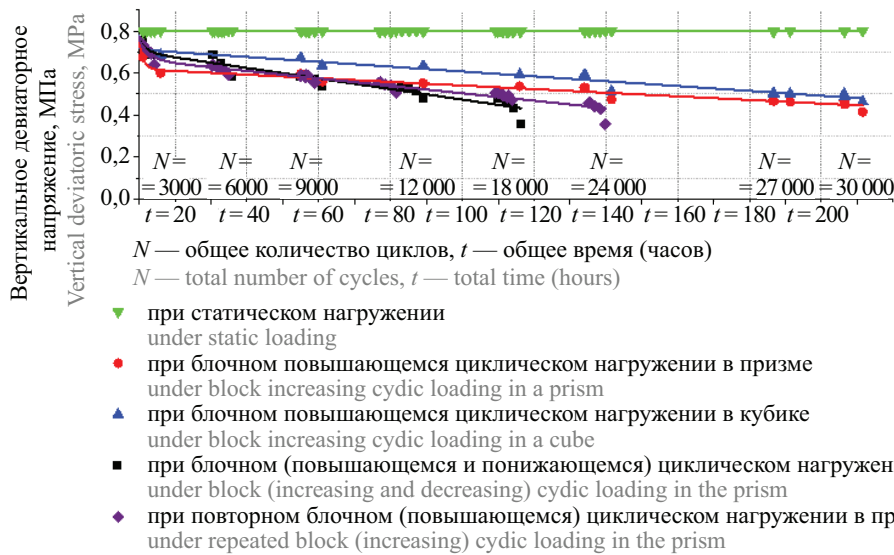


Рис. 4. Изменение предельно допустимого вертикального девиаторного давления грунта при блочном циклическом нагружении

Fig. 4. Variation of maximum allowable vertical deviatoric soil pressure under block cyclic loading

и недостаточная несущая способность — общие проблемы фундаментов на глинистых грунтах. При расчете несущей способности фундаментов необходимо учесть, что фундамент должен быть устойчивым и иметь возможность выдержать смещение или опрокидывание [29]. Характер разрушения фундамента при достижении им предельного состояния должен быть статически и кинематически возможным для данного воздействия (рис. 5).

Несущая способность фундамента считается обеспеченной в случае, если будет выполнено условие по СП 22.13330:

$$F \leq \frac{\gamma_c \cdot F_n}{\gamma_n}, \quad (1)$$

где F — расчетная нагрузка на основание; γ_c — коэффициент условий работы; F_n — сила предельного сопротивления основания; γ_n — коэффициент надежности по ответственности.

В соответствии с нормами проектирования фундаментов расчетное сопротивление грунта (несущая способность) под основанием фундамента определяется соотношением:

$$N_u = b' \cdot l' \cdot (N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_1 + N_q \xi_q \gamma'_1 + N_c \xi_c C_1), \quad (2)$$

где b' и l' — ширина и длина фундамента, м; N_γ , N_q и N_c — безразмерные коэффициенты несущей способности грунта под подошвой фундамента, зависящие от угла внутреннего трения φ ; ξ_γ , ξ_q , ξ_c — коэффициенты, зависящие от соотношения длины и ширины сечения; γ_1 и γ'_1 — удельный вес грунта над и под подошвой фундамента.

Прочностные характеристики $C(N, t, \tau)$ и $\varphi(N)$ при стационарном и нестационарном циклическом нагружении определяют по формулам (3), (4), тогда значение удельного сцепления при блочном циклическом режиме нагружения представляют следующим образом:

$$C(N, t, \tau) = C_0 + \sum_{i=1}^n \Delta C_{dpl}(t, \tau) - \sum_{j=1}^m \Delta C(N, t), \quad (3)$$

где C_0 — начальное значение удельного сцепления грунта; $\Delta C_{dpl}(t, \tau)$ — изменение удельного сцепления на этапах всесторонних и девиаторных нагружений; $\Delta C(N, t)$ — изменение удельного сцепления под действием блочной циклической нагрузки.

Таким образом, уравнение удельного сцепления при циклическом нагружении блочного режима выглядит так:

$$\begin{aligned} C(N, t, \tau) = & C_0 + \sum_{i=1}^n \Delta C_{dpl}(t, \tau) - \sum_{j=1}^m \Delta C(N, t) = \\ = & \left[\left[C_0 + \left[C_0 \cdot \sum_{i=1}^n \left(2 \cdot \left(\Delta \varepsilon_{ij}^{pl}(t, \tau) - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \cdot \delta_{ij} \right) \times \right. \right. \right. \right. \\ & \times \left. \left. \left. \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \right)^{1/2} \right] - \right. \\ & \left. - \sum_{j=1}^m \left(K_{epli}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0) + \right. \right. \\ & \left. \left. + K_{\gamma pli}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0) \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta \varepsilon_{ij}^{pl}(t, \tau)$ — прирост величины тензора деформаций ползучести на соответствующих ступенях нагружения; $\Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau)$ — прирост величины объемных деформаций ползучести на соответствующих ступенях нагружения; δ_{ij} — дельта Кронекера; $\Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)$ и $\Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0)$ — прирост вертикальных и сдвиговых деформаций циклической ползучести в возрастающих и убывающих блоках циклической нагрузки; $K_{epli}^v(N, t, t_0)$ и $K_{\gamma pli}^v(N, t, t_0)$ — параметры пропорциональности отношения между $\Delta C(N, t, t_0)$ и $\Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)$ и $\Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0)$, определенные на основе экспериментальных исследований.

При этом величина изменения угла внутреннего трения φ грунта оценивается по уравнению:

$$\varphi(N, t, \tau) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\tau_{ultgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{(N, t)} \right), \quad (5)$$

где $\varphi(N, t, \tau)$ и $C(N, t, \tau)$ — характеристики прочности грунта при циклической нагрузке блочного режима; $\tau_{ultgrt}(N, t) = \sigma(N, t) \cdot \operatorname{tg} \varphi(N, t, \tau) + C(N, t, \tau)$ —

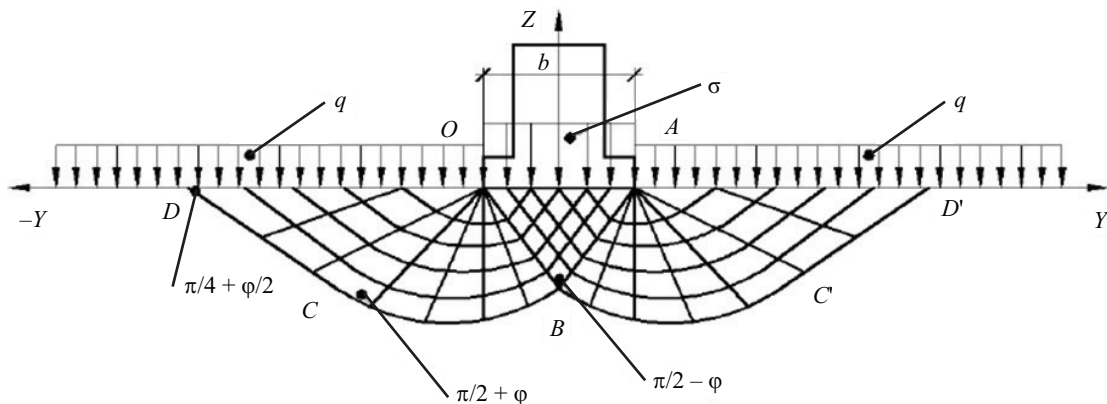


Рис. 5. Схема расчета несущей способности фундамента

Fig. 5. Scheme for calculating the bearing capacity of the foundation

условие прочности Кулона – Мора при циклическом нагружении блочного режима; $\sigma(N, t)$ — максимальное нормальное напряжение при циклической нагрузке блочного режима.

В таком случае уравнение предельной несущей способности фундамента после трансформации записывается следующим образом:

$$N_u = b' \cdot l' \cdot \left[(N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_1 + N_q \xi_q \gamma'_1 + N_c \xi_c \times \right. \\ \times \left. \left(\left[C_0 + C_0 \cdot \sum_{i=1}^n \left(2 \cdot \left(\Delta \varepsilon_{ij}^{pl}(t, \tau) - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \cdot \delta_{ij} \right) \times \right. \right. \right. \right. \\ \times \left. \left. \left. \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \right)^{1/2} \right] - \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^m K_{epli}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0) + \right. \\ \left. + K_{ypli}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0) \right]. \quad (6)$$

После преобразования функция несущей способности грунта при стационарном и нестационарном циклическом нагружении принимают следующий вид:

$$N_\gamma = (N_q - 1) \cdot \left(\arctg \left(\frac{\tau_{ulgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{(N, t)} \right) \right); \\ N_q = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\Phi_1}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \arctg \left(\frac{\tau_{ulgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{\sigma(N, t)} \right)}; \quad (7) \\ N_c = \frac{N_q - 1}{\arctg \left(\frac{\tau_{ulgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{(N, t)} \right)}.$$

Осадка глинистых оснований при блочном циклическом нагружении

Общий процесс геотехнического осадконакопления состоит из трех основных компонентов, происходящих на разных стадиях: мгновенная осадка (также известная как упругая осадка); консолидационная осадка (или первичная); осадка ползучести (или вторичная). Как следует из названия, мгновенная осадка происходит сразу после приложения нагрузки к грунту. При приложении нагрузки

напряжения в грунте изменяются, частицы грунта перестраиваются, что приводит к уменьшению объема свободного пространства грунта. Консолидационная осадка появляется из-за того, что вода с течением времени постепенно вытесняется из промежутков между частицами грунта. В результате уменьшается свободное пространство грунта, разделяющее частицы грунта, и грунт смещается вниз.

После завершения фазы консолидирующей осадки начинается осадка ползучести. Эта часть осадки грунта продолжается в течение длительного времени под действием давления от внешней нагрузки — величина ползучести зависит от типа грунта и его анизотропии, а также от истории напряжений и уровня напряжений в грунте [30]. Расчетный метод основан на понятии послойного суммирования, учитывает объемное напряженное состояние грунта и механическое изменение его состояния в режимном нагружении. В результате расчетом производится осадка фундаментов при действительном режимном нагружении (рис. 6).

Воспринимается объемное напряженное состояние, при этом состояние грунта основания сжимаемой толщи разделяется на несколько слоев, в каждом слое по девиатору напряжений определяются деформации, соответствующие величине вертикального давления, а затем значения деформаций в пределах сжимаемой толщи суммируются [10, 11].

Прирост величины деформации в момент нагружения определяется по уравнению:

$$\Delta \varepsilon_{zi} = \frac{\Delta \sigma_z}{G_v} - \Delta G \cdot \frac{3k_v - G_v}{3k_v \cdot G_v}. \quad (8)$$

Прирост величины осевых деформаций при циклическом нагружении блочного режима устанавливается следующим образом:

$$\varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0) = \sum_{i=1}^n \left[\sigma_i^{\max}(N, t, t_0) \cdot k_R \left\{ \left[\frac{f_{UP}(N)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \times \right. \right. \\ \times f_{UP}(N) \cdot \rho_{cyc} + \left. \left[\frac{f_{dow}(N)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{dow}(N) \cdot \rho_{cyc} + \right.$$

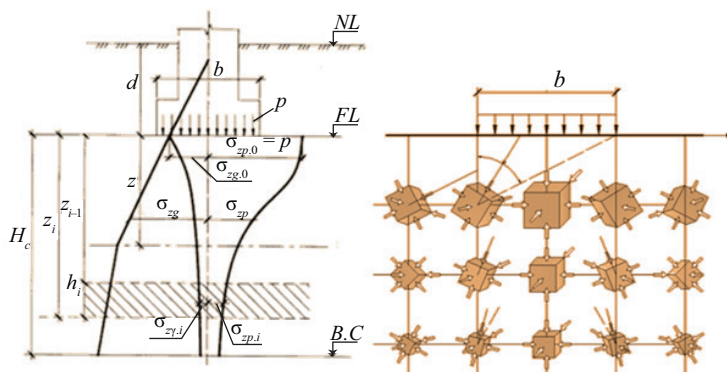


Рис. 6. Схема расчета осадки фундамента при режимном нагружении

Fig. 6. Schematic diagram for calculation of foundation settlement under mode loading

$$\begin{aligned} & + \left[\frac{f(t)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \times \\ & \times f(t) + \left[\frac{f_{UP}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{UP}(t_0) + \\ & + \left[\frac{f_{dow}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{dow}(t_0) \left. \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\sigma_i^{\max}(N, t, t_0)$ — максимальные вертикальные напряжения в блоках блочного режима нагружения; k_R — фактор, определяющий соотношение параметров ползучести грунта блочного режима нагружения; $\sigma(N, t, t_0)$ — допустимые вертикальные напряжения при режиме блочного циклического нагружения; $\rho_{\text{сис}}$ — асимметричность цикла вертикального напряжения; $f_{UP}(N), f_{dow}(N), f(t), f_{UP}(t_0), f_{dow}(t_0)$ — функции циклических деформаций ползучести грунта в повышающих и понижающих блоках режимного блочного циклического нагружения.

При этом осадка фундамента при циклическом нагружении блочного режима выявляется по уравнению:

$$S(N, t, t_0) = \sum_i^n [\Delta \varepsilon_{zi} + \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)] \cdot h_i, \quad (10)$$

где n — количество слоев; ε_{zi} — прирост осевых деформаций i -го слоя в момент прикладывания нагрузки; $\varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)$ — прирост осевых деформаций при циклическом нагружении блочного режима; h_i — толщина i -го слоя.

С целью оценки предложенных уравнений для расчета осадки фундаментов проведены штамповые исследования глинистых фундаментов (модели плитных фундаментов в лотках размером $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м). На основе анализа полученных результатов испытаний за развитием осадок плиточного фундамента в лотках при циклическом нагружении блочного режима можно сделать вывод, что представленная зависимость изменения осадочной величины при режиме блочного циклического нагружения является полной аналогией результатам

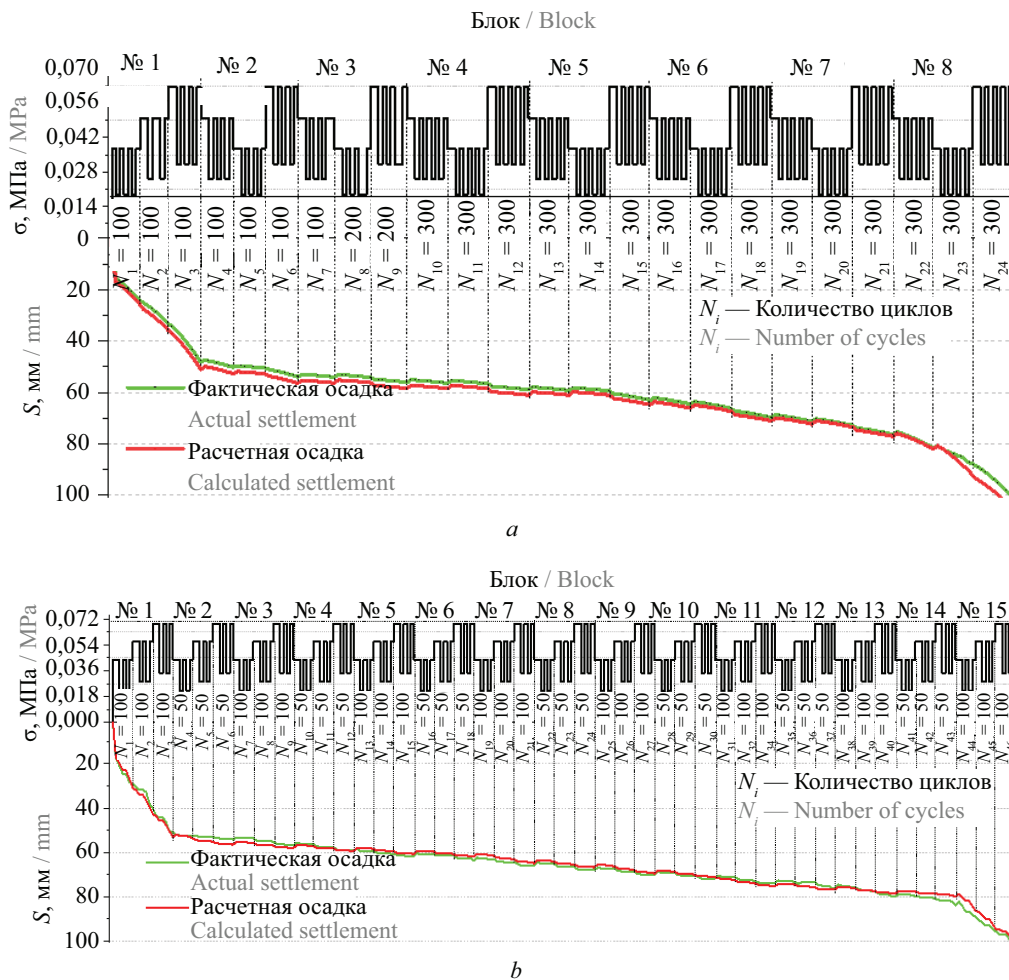


Рис. 7. Оценка осадки моделей плитных фундаментов при циклическом нагружении блочного режима в объемном лотке: а — при повышающемся и понижающемся блочном нагружении; б — при повторно повышающемся блочном нагружении
Fig. 7. Settlement estimation of slab foundation models under cyclic block regime loading in volumetric trough: a — under increasing and decreasing block loading; b — under repeatedly increasing block loading

данных исследований. Расчетные значения имеют расхождения с экспериментальными в пределах 10–20 % (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- в результате анализа и обобщений были составлены уравнения предельной несущей способности глинистого основания при циклическом нагружении блочного режима, учитывающие одновременно изменение не только реологических, но и прочностных характеристик глинистых грунтов;

- разработан новый метод расчета осадки глинистого основания, в основу которого положен метод послойного суммирования, учитывающий одновременно изменение НДС и механических характеристик грунта при циклическом нагружении в условиях блочного режима;

- анализ полученных результатов расчетов по предлагаемой инженерной методике оценки несущей способности и осадки глинистых оснований при циклическом нагружении блочного режима соответствует экспериментальным данным по лоткам. При этом расчетные значения имеют расхождения с экспериментальными в пределах 10–20 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 210. P. 110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289

2. Karim H.H., Samueel Z.W., Jassem A.H. Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading // *Civil Engineering Journal*. 2020. Vol. 6. Issue 2. Pp. 225–237. DOI: 10.28991/cej-2020-03091466

3. Wang Y., Wan Y., Wan E., Zhang X., Zhang B., Zhong Y. The pore pressure and deformation behavior of natural soft clay caused by long-term cyclic loads subjected to traffic loads // *Marine Georesources and Geotechnology*. 2021. Vol. 39. Issue 4. Pp. 398–407. DOI: 10.1080/1064119X.2019.1707915

4. Fu Z., Wang G., Song W., Yu Y., Wei P., Wu T. Deformation behavior of saturated soft clay under cyclic loading with principal stress rotation // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 19. P. 8987. DOI: 10.3390/app11198987

5. Wichtmann T., Tafili M., Staubach P., Macháček J. Soil behaviour under cyclic loading-experiments, constitutive modelling and numerical applications // 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. 2023. DOI: 10.53243/NUMGE2023-435

6. Shah S.A., Asif A.R., Ahmed W., Islam I., Waseem M., Janjuhah H.T. et al. Determination of dynamic properties of fine-grained soils at high cyclic strains // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. Issue 7. P. 204. DOI: 10.3390/geosciences13070204

7. Civelekler E. Using GIS for the allowable soil bearing capacity estimation according to the Terzaghi (1943) equation in Eskişehir city center, Türkiye // *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2023. Vol. 8. Issue 3. Pp. 310–317. DOI: 10.26833/ijeg.1212584

8. Karkush M.O., Ahmed M.D., Sheikha A.A.H., Al-Rumaihi A. Thematic maps for the variation of bearing capacity of soil using SPTs and MATLAB // *Geo-*

sciences. 2020. Vol. 10. Issue 9. P. 329. DOI: 10.3390/geosciences10090329

9. Cheng H., Zhang H., Liu Z., Wu Y. Prediction of undrained bearing capacity of skirted foundation in spatially variable soils based on convolutional neural network // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 11. P. 6624. DOI: 10.3390/app13116624

10. Adunoye G.O., Kareem S.P., Odetola H.M. Experimental investigation on the bearing capacity of selected soils in ayedaade local government Area, Osun State, Nigeria // *International Journal of Civil Engineering, Construction and Estate Management*. 2023. Vol. 11. Issue 1. Pp. 45–57. DOI: 10.37745/ijcecem.14/vol11n14557

11. Dasho D.K., Aga B.B. Comprehensive characterization of soils with analytical and numerical simulation for bearing capacity and settlement requirements of the footing // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2023/2290515

12. Sychkina E.N., Ofrikhter I.V., Ponomarev A.B. Bearing capacity equations of piles in weathered claystone and sandstone // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 5 (97). P. 9704. DOI: 10.18720/MCE.97.4. EDN GTXKVR.

13. Xia H., Zhou M., Niu F., Zhang X., Tian Y. Combined bearing capacity of bucket foundations in soft-over-stiff clay // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 126. P. 103299. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103299

14. Yang C., Zhu Z., Xiao Y. Bearing capacity of ring foundations on sand overlying clay // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 13. P. 4675. DOI: 10.3390/app10134675

15. Zhao X., Fu Z., Yang Q., Geng D., Wang Z. Study on bearing capacity performance and influence factors of phyllite soil blended with red clay // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1637. Issue 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1637/1/012033

16. Benmoussa S., Benmehbarek S., Benmehbarek N. Bearing capacity factor of circular footings on two-

layered clay soils // Civil Engineering Journal. 2021. Vol. 7. Issue 5. Pp. 775–785. DOI: 10.28991/cej-2021-03091689

17. *Hataf N., Nabipour N., Sadr A.* Experimental and numerical study on the bearing capacity of encased stone columns // International Journal of Geo-Engineering. 2020. Vol. 11. Issue 1. DOI: 10.1186/s40703-020-00111-6

18. *Bhardwaj A., Sharma R.K.* Bearing capacity evaluation of shallow foundations on stabilized layered soil using ABAQUS // Studia Geotechnica et Mechanica. 2023. Vol. 45. Issue 1. Pp. 55–71. DOI: 10.2478/sgem-2022-0026

19. *He P., Newson T.* Undrained capacity of circular shallow foundations on two-layer clays under combined VHMT loading // Wind Engineering. 2023. Vol. 47. Issue 3. Pp. 579–596. DOI: 10.1177/0309524x-221142276

20. *Fadhil A., Mandeel S.A.H., Mekkiyah H.M.* Bearing capacity of square footing resting on layered soil // Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences. 2020. DOI: 10.30772/qjes.v13i4.700

21. *Samy M., Abdelfattah A., Fayed A., Sorour T., Elshawaf M.* Prediction of the settlement associated with construction on soft clay improved using rigid inclusions considering the installation effect // Engineering Research Express. 2023. Vol. 5. Issue 1. P. 015071. DOI: 10.1088/2631-8695/acc3de

22. *Мирсаяпов И.Т., Шараф Хани Х.М.* Экспериментальные исследования несущей способности и осадки оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных режимных циклических нагружениях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 1 (47). С. 175–182. EDN ZCTFHN.

23. *Мирсаяпов И.Т., Шараф Х.М.А.* Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагружениях // Известия Казан-

ского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 18–25. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18. EDN BOODTM.

24. *Mirsayapov I.T.* Method of Calculating the Strength of Clay Soils Under Triaxial Regime Loading // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 150–159. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_16

25. *Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A.* Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations on clays under regime block cyclic loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. P. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012134

26. *Koroleva I.* Assessment of clay soils strengthening under triaxial cyclic loading // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403025

27. *Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A.* Features of clay soil deformation under triaxial block regime cyclic loading, taking into account the formation of micro and macro-cracks // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1928. Issue 1. P. 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012038

28. *Mirsayapov I., Sharaf H.M.A.* Studies of clay soils under triaxial block cyclic loading // XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. 2023. Pp. 2378–2386. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_259

29. *Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A.* Bearing capacity and settlement of foundations on clayey soils under regime block cyclic loading // Smart Geotechnics for Smart Societies. 2023. Pp. 1345–1350. DOI: 10.1201/9781003299127-197

30. *Al-Saidi A., Al-Juari K.H., Fattah M.Y.* Reducing settlement of soft clay using different grouting materials // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. 2022. Vol. 31. Issue 1. Pp. 240–247. DOI: 10.1515/jmbm-2022-0033

Поступила в редакцию 16 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илизар Талгатович Мирсаяпов** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оснований фундаментов динамики сооружений и инженерной геологии, член-корреспондент РААСН; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);** 420043, г. Казань, Зеленая, д. 1; Scopus: 54403302600, ResearcherID: K-6143-2018, ORCID: 0000-0002-6193-0928; mirsayapov1@mail.ru;

Шараф Хани Мохаммед Абдо — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры оснований фундаментов динамики сооружений и инженерной геологии; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);** 420043, г. Казань, Зеленая, д. 1; SPIN-код: 4993-7539, Scopus: 57218824686, ORCID: 0000-0001-9755-965X; hani_2012@mail.ru.

Вклад авторов:

Мирсаяпов И.Т. — научное руководство, идея, доработка текста, итоговые выводы.

Шараф Х.М.А. — сбор материалов и их обработка, вычисления, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep. *Engineering Structures*. 2020; 210:110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289
2. Karim H.H., Samuel Z.W., Jassem A.H. Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading. *Civil Engineering Journal*. 2020; 6(2):225-237. DOI: 10.28991/cej-2020-03091466
3. Wang Y., Wan Y., Wan E., Zhang X., Zhang B., Zhong Y. The pore pressure and deformation behavior of natural soft clay caused by long-term cyclic loads subjected to traffic loads. *Marine Georesources and Geotechnology*. 2021; 39(4):398-407. DOI: 10.1080/1064119X.2019.1707915
4. Fu Z., Wang G., Song W., Yu Y., Wei P., Wu T. Deformation behavior of saturated soft clay under cyclic loading with principal stress rotation. *Applied Sciences*. 2021; 11(19):8987. DOI: 10.3390/app11198987
5. Wichtmann T., Tafili M., Staubach P., Macháček J. Soil behaviour under cyclic loading-experiments, constitutive modelling and numerical applications. *10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.53243/NUMGE2023-435
6. Shah S.A., Asif A.R., Ahmed W., Islam I., Waseem M., Janjuhah H.T. et al. Determination of dynamic properties of fine-grained soils at high cyclic strains. *Geosciences*. 2023; 13(7):204. DOI: 10.3390/geosciences13070204
7. Civelekler E. Using GIS for the allowable soil bearing capacity estimation according to the Terzaghi (1943) equation in Eskişehir city center, Türkiye. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2023; 8(3):310-317. DOI: 10.26833/ijeg.1212584
8. Karkush M.O., Ahmed M.D., Sheikha A.A.H., Al-Rumaithi A. Thematic maps for the variation of bearing capacity of soil using SPTs and MATLAB. *Geosciences*. 2020; 10(9):329. DOI: 10.3390/geosciences10090329
9. Cheng H., Zhang H., Liu Z., Wu Y. Prediction of undrained bearing capacity of skirted foundation in spatially variable soils based on convolutional neural network. *Applied Sciences*. 2023; 13(11):6624. DOI: 10.3390/app13116624
10. Adunoye G.O., Kareem S.P., Odetola H.M. Experimental investigation on the bearing capacity of selected soils in ayedaade local government area, Osun State, Nigeria. *International Journal of Civil Engineering, Construction and Estate Management*. 2023; 11(1):45-57. DOI: 10.37745/ijcecm.14/vol11n14557
11. Dasho D.K., Aga B.B. Comprehensive characterization of soils with analytical and numerical simulation for bearing capacity and settlement requirements of the footing. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023; 2023:1-15. DOI: 10.1155/2023/2290515
12. Sychkina E.N., Ofrikhter I.V., Ponomayrov A.B. Bearing capacity equations of piles in weathered claystone and sandstone. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 5(97):9704. DOI: 10.18720/MCE.97.4. EDN GTXKVR
13. Xia H., Zhou M., Niu F., Zhang X., Tian Y. Combined bearing capacity of bucket foundations in soft-over-stiff clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 126:103299. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103299
14. Yang C., Zhu Z., Xiao Y. Bearing capacity of ring foundations on sand overlying clay. *Applied Sciences*. 2020; 10(13):4675. DOI: 10.3390/app10134675
15. Zhao X., Fu Z., Yang Q., Geng D., Wang Z. Study on bearing capacity performance and influence factors of phyllite soil blended with red clay. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1637(1):012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1637/1/012033
16. Benmoussa S., Benmebarek S., Benmebarek N. Bearing capacity factor of circular footings on two-layered clay soils. *Civil Engineering Journal*. 2021; 7(5):775-785. DOI: 10.28991/cej-2021-03091689
17. Hataf N., Nabipour N., Sadr A. Experimental and numerical study on the bearing capacity of encased stone columns. *International Journal of Geo-Engineering*. 2020; 11(1). DOI: 10.1186/s40703-020-00111-6
18. Bhardwaj A., Sharma R.K. Bearing capacity evaluation of shallow foundations on stabilized layered soil using ABAQUS. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2023; 45(1):55-71. DOI: 10.2478/sgem-2022-0026
19. He P., Newson T. Undrained capacity of circular shallow foundations on two-layer clays under combined VHMT loading. *Wind Engineering*. 2023; 47(3):579-596. DOI: 10.1177/0309524x221142276
20. Fadhil A., Mandeel S.A.H., Mekkiyah H.M. Bearing capacity of square footing resting on layered soil. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*. 2020. DOI: 10.30772/qjes.v13i4.700
21. Samy M., Abdelfattah A., Fayed A., Sorour T., Elshawaf M. Prediction of the settlement associated with construction on soft clay improved using rigid inclusions considering the installation effect. *Engineering Research Express*. 2023; 5(1):015071. DOI: 10.1088/2631-8695/acc3de
22. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M. Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations of clay soils under block regime cyclic loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 1(47):175-182. EDN ZCTFHN. (rus.).
23. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M. Settlement of clay soils foundations under block cyclic loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):18-25. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18. EDN BOODTM. (rus.).

24. Mirsayapov I.T. Method of calculating the strength of clay soils under triaxial regime loading. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 150-159. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_16
25. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations on clays under regime block cyclic loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890:012134. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012134
26. Koroleva I. Assessment of clay soils strengthening under triaxial cyclic loading. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403025
27. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Features of clay soil deformation under triaxial block regime cyclic loading, taking into account the formation of micro and macro-cracks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1928(1):012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012038
28. Mirsayapov I., Sharaf H.M.A. Studies of clay soils under triaxial block cyclic loading. *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022"*. 2023; 2378-2386. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_259
29. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Bearing capacity and settlement of foundations on clayey soils under regime block cyclic loading. *Smart Geotechnics for Smart Societies*. 2023; 1345-1350. DOI: 10.1201/9781003299127-197
30. Al-Saidi A., Al-Juari K.H., Fattah M.Y. Reducing settlement of soft clay using different grouting materials. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2022; 31(1):240-247. DOI: 10.1515/jmbm-2022-0033

Received October 16, 2023.

Adopted in revised form on November 17, 2023.

Approved for publication on December 13, 2023.

B I O N O T E S: **Ilizar T. Mirsayapov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Foundations of Structural Dynamics and Engineering Geology, Corresponding Member of RAASN; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; Scopus: 54403302600, ResearcherID: K-6143-2018, ORCID: 0000-0002-6193-0928; mirsayapov1@mail.ru;

Sharaf Hani Mohammed Abdo — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Foundations of Structural Dynamics and Engineering Geology; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; SPIN-code: 4993-7539, Scopus: 57218824686, ORCID: 0000-0001-9755-965X; hani_2012@mail.ru.

Contribution of the authors:

Ilizar T. Mirsayapov — scientific guidance of the idea, finalization of the text, final conclusions.

Sharaf Hani Mohammed Abdo — collection of materials and their processing, calculations, writing the original text.

The authors declare no conflict of interest.

Сравнение методов расчета гидравлических характеристик потока в безнапорных трубопроводах

Андрей Львович Зуйков¹, Назира Тентимишовна Джумагулова¹,
Абдуламир Лейс Саид Абдуламир^{1,2}

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

² Университет Кербелы; г. Кербела, Ирак

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены три метода расчета гидравлических характеристик потока в безнапорных трубопроводах: экспериментальный, традиционный и с использованием программного обеспечения SewerCAD. Сегодня возможно дальнейшее развитие гидравлических методов расчета турбулентных течений в безнапорных трубопроводах благодаря новым способам измерения и эффективным программным продуктам. Для повышения точности гидравлических расчетов (ГР) необходимо проведение экспериментальных исследований. Цель исследования — определить гидравлические характеристики потока в безнапорных трубопроводах тремя методами и найти взаимосвязь между ними. В ходе выполнения ГР трубопроводов, обеспечивающих подачу воды на большие расстояния, следует предъявлять повышенные требования к точности конечных результатов, так как это связано с мониторингом аварийных ситуаций. При безнапорном движении жидкости движущей силой, определяющей скорость потока, является составляющая силы тяжести, направленная вдоль потока. До настоящего времени широко применяется формула, устанавливающая среднюю скорость равномерного течения в безнапорном трубопроводе, предложенная А. Шези. Определены зависимости наполнения трубы от средней скорости потока при различных уклонах. Проведено сравнение средних скоростей, полученных в результате экспериментальных исследований и расчетным путем с помощью программы SewerCAD. Правомочность практического использования предложенной методики подтверждается результатами обработки экспериментальных данных как авторами, так и другими исследователями.

Материалы и методы. Применены методы расчета турбулентных течений в безнапорных трубопроводах с помощью экспериментальных данных, традиционных методов и компьютерных технологий, что повышает точность расчетных параметров потока, надежность работы трубопроводной системы.

Результаты. Представлены результаты эксперимента, программы SewerCAD и традиционного метода расчета скорости при различных расходах для безнапорных труб из полиэтилена диаметром 100 мм при наполнении трубопровода от 0,1 до 0,8.

Выводы. Проведены лабораторные исследования по определению гидравлических характеристик потока полиэтиленового трубопровода диаметром 100 мм. Получены соответствующие зависимости для средней скорости между результатами эксперимента и программой SewerCAD для безнапорной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: методы расчета турбулентных течений, скорость потока, уклон трубы, гидравлические характеристики потока, программное обеспечение SewerCAD, безнапорное движение потока

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зуйков А.Л., Джумагулова Н.Т., Абдуламир А.Л.С. Сравнение методов расчета гидравлических характеристик потока в безнапорных трубопроводах // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 800–810. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.800-810

Автор, ответственный за переписку: Абдуламир Лейс Саид Абдуламир, laithsaeed62@gmail.com.

Comparison of methods for calculation of hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines

Andrey L. Zuykov¹, Nazira T. Dzhumagulova¹, Abdulameer Layth Saeed Abdulameer^{1,2}

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

² University of Karbala; Karbala, Iraq

ABSTRACT

Introduction. Three methods of calculation of hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines are considered. These methods are experimental, traditional and using SewerCAD software. Currently, further development of hydraulic methods for calculating turbulent flows in non-pressure pipelines is possible due to new measurement methods and effective software products. To improve the accuracy of hydraulic calculations, it is necessary to conduct experimental studies. The purpose of the work is to determine the hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines using three methods

and find the relationship between them. When carrying out hydraulic calculations of pipelines that supply water over long distances, it is necessary to place increased demands on the accuracy of the results, as this is associated with monitoring emergencies. When fluid moves without pressure, the driving force that determines the flow velocity is the component of gravity directed along the flow. To this day, the formula that determines the average velocity of a uniform flow in a non-pressure pipeline, proposed by A. Chezy, is widely used. The work established the dependence of pipe filling on the average flow velocity at various slopes. A comparison was made of the average velocity obtained as a result of experimental studies and calculations using SewerCAD programme. The validity of the practical use of the proposed methodology is confirmed by the results of processing experimental data both by the authors and by other researchers.

Materials and methods. Methods of calculation of turbulent flows in non-pressure pipelines using experimental data, traditional methods and computer technologies were applied, which increases the accuracy of the calculated flow parameters and the reliability of the pipeline system.

Results. The results of the experiment, SewerCAD programme and traditional method of velocity calculation at different flow rates for non-pressure polyethylene pipes with a diameter of 100 mm with a pipeline filling from 0.1 to 0.8 are presented.

Conclusions. Laboratory researches were carried out to determine the hydraulic characteristics of the flow of a polyethylene pipeline with a diameter of 100 mm. Corresponding dependencies for the average velocity between the experimental results and SewerCAD programme for a non-pressure system were obtained.

KEYWORDS: methods of calculation of turbulent flows, flow velocity, pipe slope, hydraulic flow characteristics, SewerCAD software, non-pressure flow

FOR CITATION: Zuykov A.L., Dzhumagulova N.T., Abdulameer A.L.S. Comparison of methods for calculation of hydraulic characteristics of flow in non-pressure pipelines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):800-810. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.800-810 (rus.).

Corresponding author: Abdulameer Layth Saeed Abdulameer, laithsaeed62@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентное движение жидкости представляет собой одно из сложнейших гидравлических явлений [1–10]. Вследствие сложной картины движения частиц жидкости в турбулентном потоке до сих пор нет законченной строгой теории такого движения.

Усовершенствование методов гидравлического расчета (ГР) водопроводных сетей — необходимое условие дальнейшего улучшения проектирования трубопроводных систем для транспортирования воды, повышения эффективности их дальнейшего использования и снижения стоимости строительства [11–22].

Сравнение метода моделирования ГР трубопроводных сетей подачи воды обеспечивает возможность глубокого и всестороннего анализа их работы [23–29].

Значительное повышение эффективности магистральных систем транспортирования воды может быть получено за счет улучшения гидравлических характеристик потока и правильного подбора параметров трубы путем применения методов моделирования при определении потерь напора в трубопроводах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гидравлический расчет самотечной трубы

Гидравлический расчет трубы с незаполненным сечением осложняется тем, что площадь живого сечения потока при этом оказывается зависимой от двух переменных — диаметра трубы и глубины наполнения h . Обычно расчет безнапорных труб ведут в предположении равномерного движения потока и, следовательно, основной расчетной формулой является уравнение Шези. При равномерном движении пьезометрический уклон равен гидрав-

лическому уклону, поэтому уравнение Шези можно представить в следующем виде:

$$Q = \omega \cdot V; \quad (1)$$

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot i} = C \sqrt{R \cdot dnj/ds}, \quad (2)$$

где Q — измеренный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; ω — площадь живого сечения потока, м^2 ; V — средняя скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; C — коэффициент Шези (в зависимости от гидравлического радиуса и коэффициента шероховатости смачиваемого трубопровода площадь, $\text{м}^{0.5}/\text{с}$); R — гидравлический радиус; $i = dnj/ds$ — гидравлический уклон.

Следует иметь в виду, что при заданной шероховатости стенок и уклоне дна трубы гидравлический радиус не может быть принят больше, чем $R_{\text{гн}}$ при гидравлически наиболее выгодном профиле.

Смоченный периметр при наполнении от 0,1 до 0,8 можно определить по формулам:

$$\chi_1 = 3,14 \cdot r \cdot \beta_1/180; \quad (3)$$

$$\chi_2 = 3,14 \cdot r \cdot \beta_2/180, \quad (4)$$

где χ_1 — смоченный периметр при наполнении $h/d \geq 0,5$; χ_2 — смоченный периметр при наполнении $h/d \leq 0,5$.

Центральные углы β_1 и β_2 определяются по выражениям:

$$\beta_1 = 360 - 2\alpha_1; \quad (5)$$

$$\beta_2 = 2\alpha_2; \quad (6)$$

$$\cos \alpha_1 = a_1/r \text{ и } \cos \alpha_2 = a_2/r. \quad (7)$$

Гидравлические радиусы R_1 и R_2 рассчитываются по формулам:

$$R_1 = \omega_1/\chi_1; \quad (8)$$

$R_2 = \omega_2 / \chi_2.$ (9)

На рис. 1 показано поперечное сечение трубы, которая отображает определения параметра α в зависимости от наполнения трубы, на рис. 2 приведен участок трубы с сечениями, где производились замеры.

На рис. 3 представлена экспериментальная установка, эксперименты проводились в лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения МГСУ.

Исследования выполнены с использованием полиэтиленовой трубы ПНД ГОСТ 18599–83 110С 200 номинальным диаметром 100 мм в диапазоне уклонов трубопровода (0,005–0,03).

Методика расчета для определения характеристик потока в безнапорном трубопроводе

Н.Н. Павловский предложил формулу для определения коэффициента Шези C :

$C = \frac{1}{n} R^y,$ (10)

где n — коэффициент шероховатости стенок труб; y — переменный показатель степени, в расчетах по Маннингу значение этого показателя $y = 1/6$.

Основное расчетное уравнение равномерно-го движения для установления расхода и скорости представлено в выражениях (1) и (2). С гидравлической точки наивыгоднейшей формой поперечного

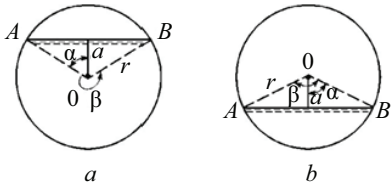


Рис. 1. Поперечное сечение трубы для определения углов α и β : a — при $h/d \geq 0,5$; b — при $h/d \leq 0,5$

Fig. 1. Pipe cross section to determine angles α and β : a — at $h/d \geq 0.5$; b — at $h/d \leq 0.5$

сечения является такая, которая при заданном уклоне обеспечивает наибольшую пропускную способность (рис. 4).

Далее рассчитаем гидравлические параметры:

$\frac{h}{d} = \frac{(1 - \cos \varphi)}{2};$ (11)

$\omega = \frac{1}{8} \cdot (\varphi - \sin \varphi) \cdot d^2;$ (12)

$X = \frac{\varphi \cdot d}{2};$ (13)

$R = \frac{\omega}{X}.$ (14)

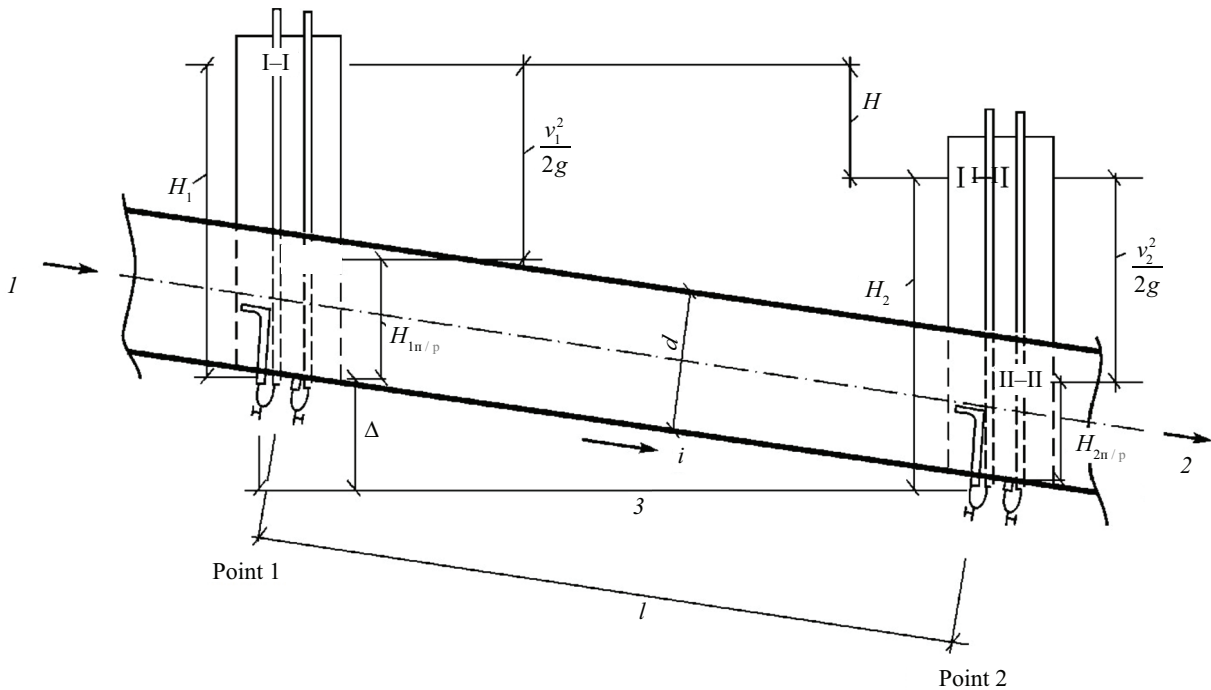


Рис. 2. Эскиз опытного гидравлического стенда: $v_1^2/2g$ и $v_2^2/2g$ — скоростные напоры; d — внутренний диаметр, м; H_{1n} и H_{2n} — показания пьезометра; i — уклон трубопровода (0,005–0,03); Δ — перепад высот при соответствующих уклонах, м; I–I — уровень воды в трубках Пито, м; II–II — уровень воды в пьезометрах, м

Fig. 2. Sketch of experimental hydraulic stand: $v_1^2/2g$ and $v_2^2/2g$ — velocity pressures; d — internal diameter, m; H_{1n} and H_{2n} — piezometer readings; i — pipeline slope (0.005–0.03); Δ — height difference at corresponding slopes, m; I–I — water level in Pitot tubes, m; II–II — water level in piezometers, m



Рис. 3. Общий вид экспериментального стенда
Fig. 3. General view of the experimental stand

Программа SewerCAD

Программное обеспечение (ПО) SewerCAD — программа для проектирования и анализа самотеч-

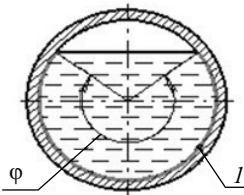


Рис. 4. Поперечное сечение самотечной трубы: I — смоченный периметр
Fig. 4. Cross section of a gravity pipe: I — wetted perimeter

ных и напорных потоков в трубопроводных сетях и насосных станциях. Программа может работать в режиме AutoCAD, предоставляя все возможности AutoCAD, или в автономном режиме с применением специального графического интерфейса. SewerCAD позволяет построить графическое представление сети трубопроводов, содержащее такую информацию, как данные о трубах, сведения о насосах, нагрузке и инфильтрации. Гравитационная сеть рассчитывается с помощью встроенной чис-

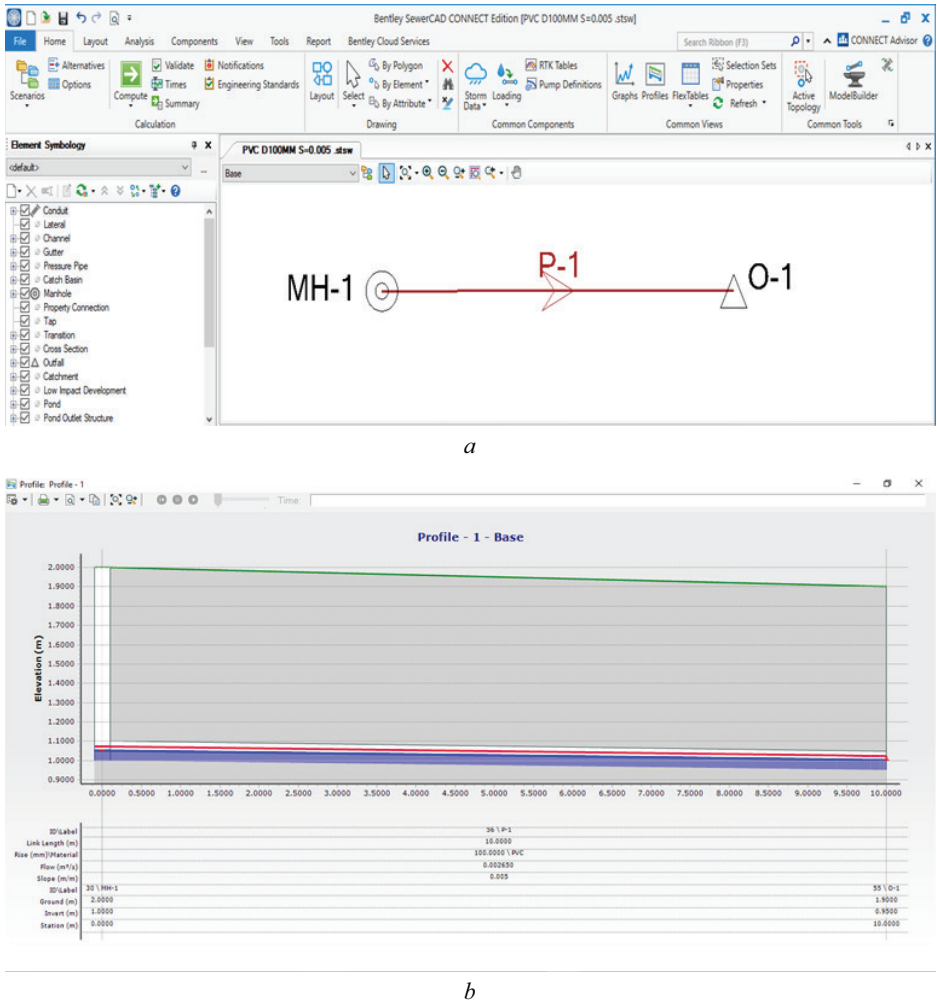


Рис. 5. Имитационная модель с использованием программы SewerCAD: a — модель; b — продольный профиль трубопровода
Fig. 5. Simulation model using SewerCAD: a — model; b — longitudinal pipeline profile

Результаты эксперимента, программы SewerCAD и традиционного метода расчета скорости при различных расходах для безнапорных труб из полиэтилена диаметром 100 мм
Results of the experiment, SewerCAD programme and traditional method of velocity calculation at various flow rates for non-pressure polyethylene pipes with a diameter of 100 mm

Наполнение <i>h/d</i> Filling <i>h/d</i>	<i>i</i> = 0,005				<i>i</i> = 0,01			
	Расход <i>Q</i> , м³/с Flow <i>Q</i> , m³/s	Скорость <i>V</i> эксперимент, м/с Velocity <i>V</i> experiment, m/s	Скорость <i>V</i> SewerCAD, м/с Velocity <i>V</i> SewerCAD, m/c	Скорость <i>V</i> расчет, м/с Velocity <i>V</i> calculation, m/c	Расход <i>Q</i> , м³/с Flow <i>Q</i> , m³/c	Скорость <i>V</i> экс- перимент, м/с Velocity <i>V</i> experi- ment, m/s	Скорость <i>V</i> SewerCAD, м/с Velocity <i>V</i> SewerCAD, m/c	Скорость <i>V</i> расчет, м/с Velocity <i>V</i> calculation, m/c
0,1	0,00009	0,238	0,251	0,267	0,00013	0,337	0,365	0,378
0,2	0,00044	0,393	0,409	0,411	0,00062	0,557	0,578	0,582
0,3	0,00099	0,504	0,516	0,520	0,00140	0,709	0,730	0,735
0,4	0,00175	0,601	0,604	0,607	0,00248	0,846	0,855	0,859
0,5	0,00265	0,676	0,672	0,671	0,00376	0,957	0,879	0,949
0,6	0,00362	0,736	0,724	0,715	0,00512	1,042	1,023	1,012
0,7	0,00448	0,764	0,753	0,750	0,00646	1,102	1,068	1,060
0,8	0,00548	0,813	0,762	0,758	0,00775	1,150	1,078	1,072
<i>i</i> = 0,015								
0,1	0,000169	0,413	0,454	0,464	0,000195	0,476	0,524	0,535
0,2	0,000762	0,680	0,708	0,713	0,000537	0,627	0,702	0,823
0,3	0,001727	0,872	0,896	0,901	0,000879	0,785	0,818	1,040
0,4	0,003043	1,038	1,047	1,052	0,001436	0,896	0,935	1,214
0,5	0,004601	1,170	1,165	1,163	0,001993	1,007	1,034	1,343
0,6	0,006281	1,276	1,252	1,239	0,002587	1,103	1,112	1,431
0,7	0,007917	1,334	1,308	1,299	0,003516	1,2	1,210	1,500
0,8	0,00949	1,408	1,321	1,313	0,0044	1,276	1,283	1,516
<i>i</i> = 0,025								
0,1	0,000218	0,532	0,585	0,599	0,000239	0,584	0,642	0,656
0,2	0,000601	0,705	0,785	0,920	0,001077	0,961	1,002	1,008
0,3	0,000983	0,878	0,914	1,163	0,002444	1,235	1,267	1,274
0,4	0,001607	1,002	1,046	1,358	0,004306	1,469	1,481	1,487
0,5	0,00223	1,126	1,157	1,501	0,006511	1,656	1,649	1,645
0,6	0,003079	1,233	1,266	1,600	0,008878	1,804	1,775	1,753
0,7	0,003928	1,340	1,352	1,677	0,011189	1,906	1,850	1,837
0,8	0,004937	1,429	1,436	1,696	0,013453	1,996	1,867	1,857

ленной модели, в которой используются как метод прямого шага, так и метод постепенного изменения потока со стандартным шагом. Напорными элементами можно управлять на основе гидравлики системы, включая и выключая насосы из-за изменений потоков и давлений.

ПО SewerCAD может быть использовано для:

- проектирования и анализа безнапорных систем;
- разработки и анализа различных сценариев проектирования канализационных систем;
- импорта и экспорта файлов AutoCAD и MicroStation DXF;
- создания планов и профилей участков сети.

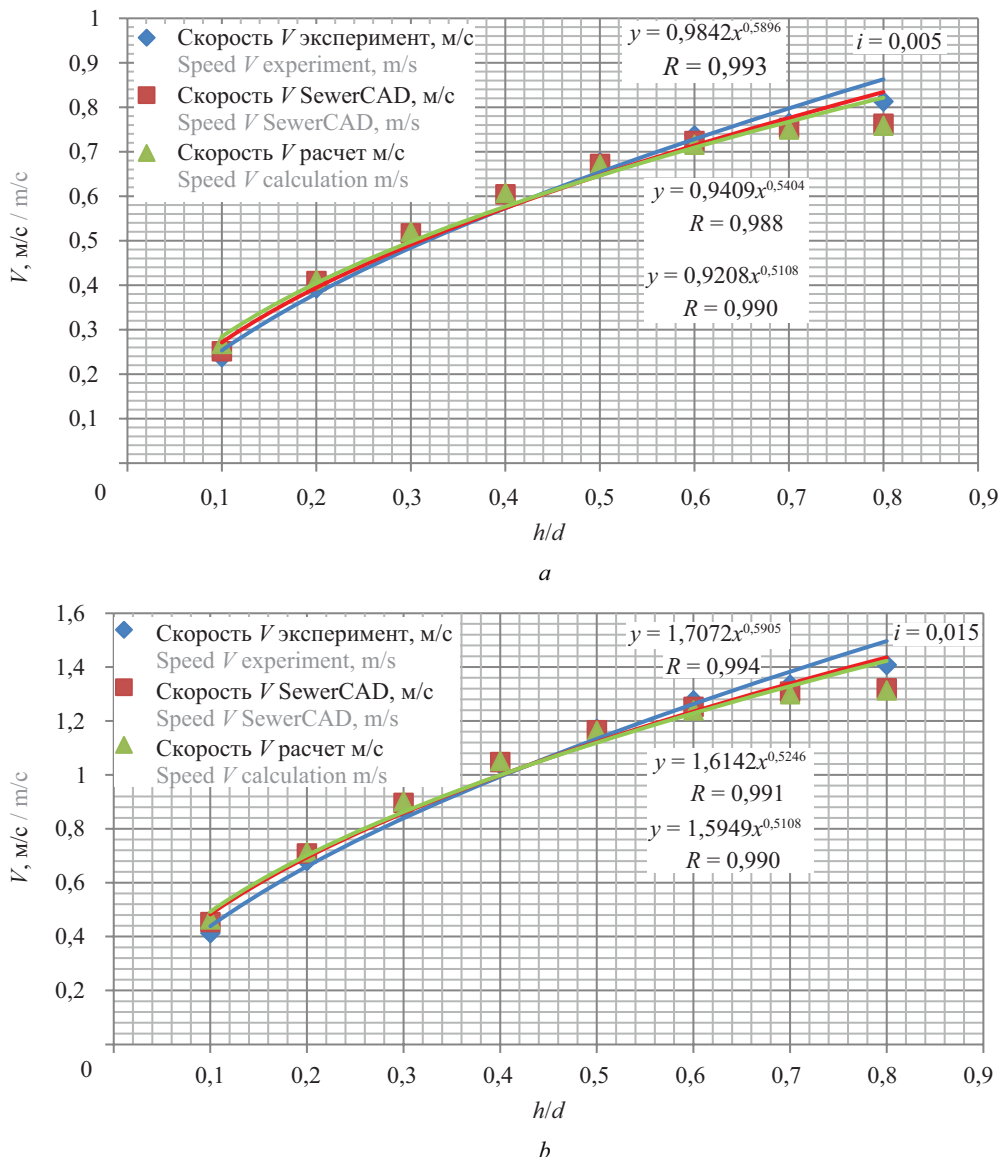
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После завершения экспериментов полученные результаты сравнивались с результатами расчетных и традиционных методов. Программа SewerCAD была применена для создания имитационной модели движения жидкости в трубе в безнапорном режи-

ме. Выполнены расчеты гидравлических характеристик потока в полиэтиленовой трубе при различных уклонах с учетом заполнения h/d в пределах 0,1–0,8. На рис. 5 показана имитационная модель с использованием ПО SewerCAD.

Уравнение Маннинга использовалось в программе для расчета скорости, гидравлического радиуса и заполнения h/d для каждого уклона. Проведены расчеты гидравлических характеристик потока в полиэтиленовой трубе при различных уклонах с учетом наполнения h/d в пределах 0,1–0,8 и диапазоне уклонов трубопровода 0,005–0,03. Сравнение средних скоростей, рассчитанных при различных расходах, экспериментальным, программным и традиционными методами, представлено в таблице.

Из таблицы видно, что скорости, рассчитанные при различных расходах, экспериментальным, программным и традиционными методами, близки по значению.



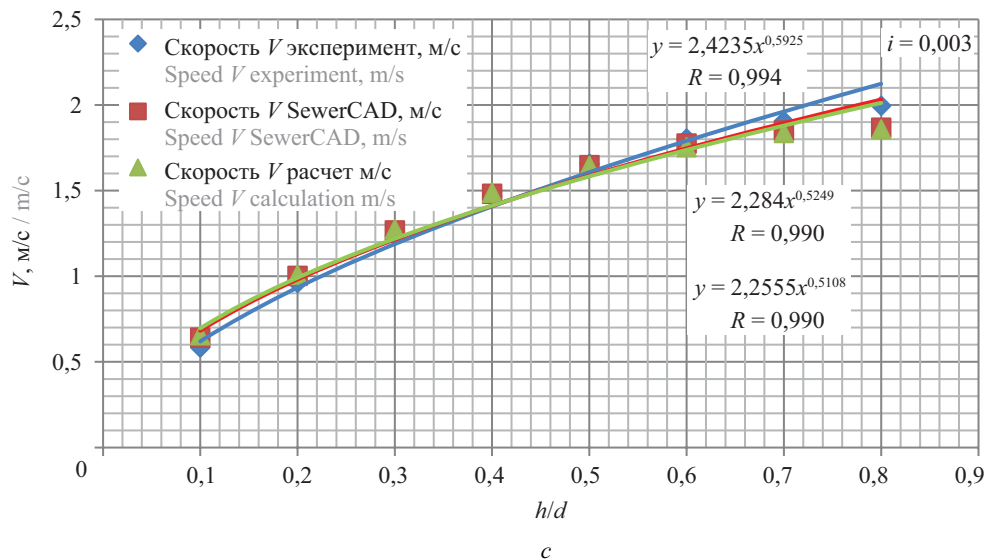
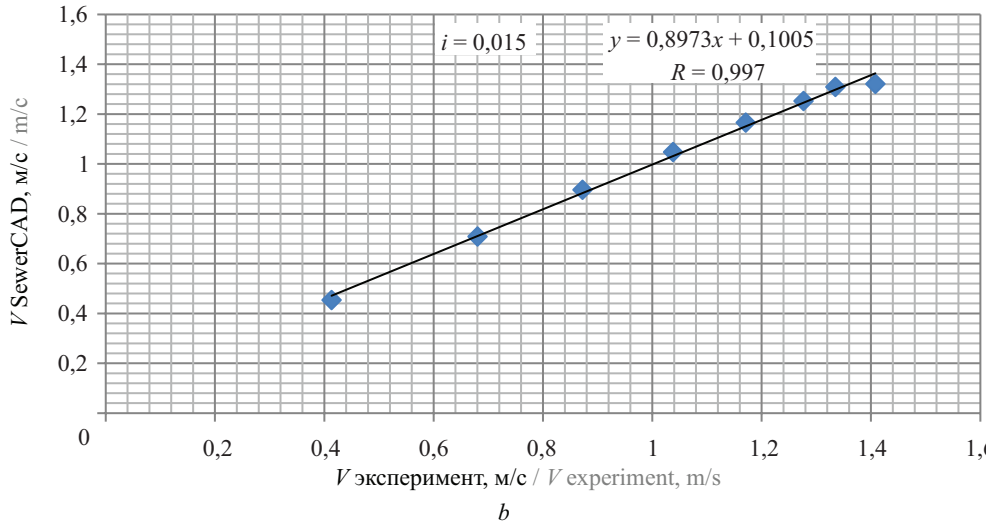
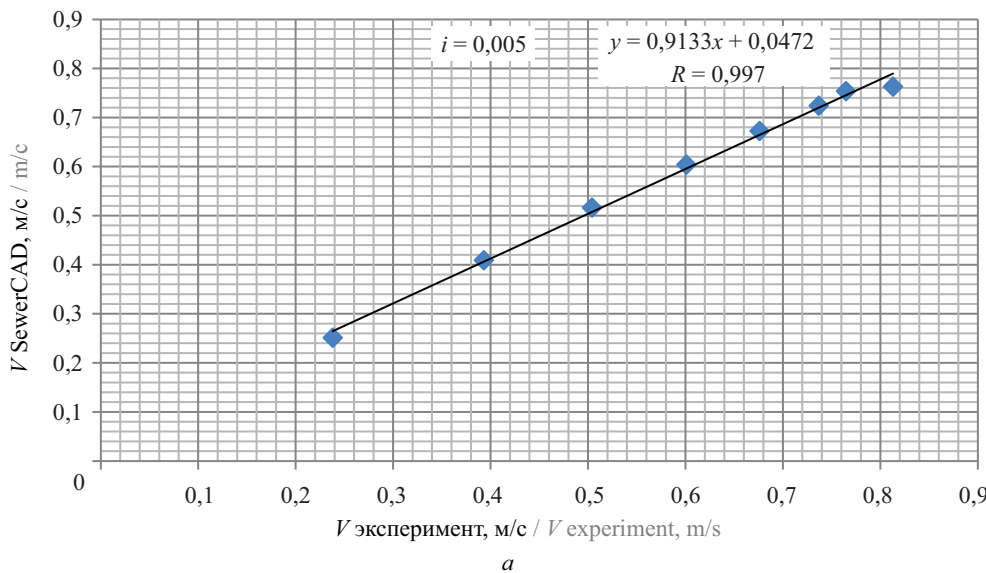


Рис. 6. Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными традиционными методами и программой SewerCAD

Fig. 6. Comparison of the experimental results with the results obtained by traditional methods and SewerCAD programme



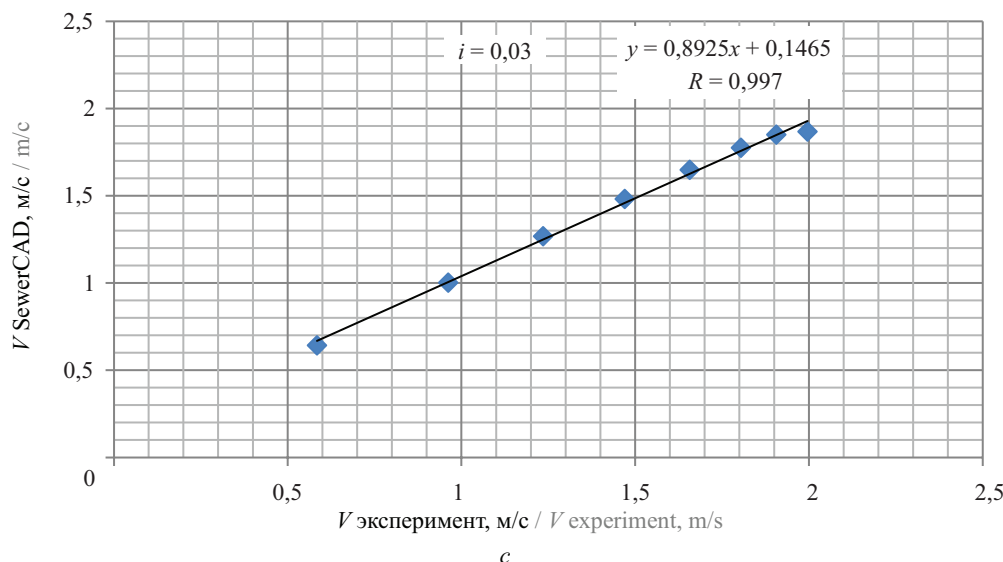


Рис. 7. Зависимость между экспериментальной скоростью и расчетной, полученными с использованием имитационной модели SewerCAD

Fig. 7. Relationship between experimental and calculated velocity obtained using the simulation model SewerCAD

Сравнение скоростей, рассчитанных при различных расходах, экспериментальным, программным и традиционным методами, представлено на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что скорость потока воды в эксперименте, программе и традиционных методах практически идентична. На рис. 7 приведена зависимость между экспериментальной скоростью и имитационной моделью.

Необходимо отметить, что коэффициент корреляции для трех случаев составил $R = 0,997$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для безнапорного трубопровода получены значения средней скорости потока при различной степени наполнения и уклона. Установлено, что значения скоростей потока, полученные в эксперименте, традиционным методом и с помощью программы SewerCAD, практически идентичны.

Получены соответствующие зависимости для средней скорости между результатами эксперимента и программой SewerCAD для безнапорной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Olgarenko G., Olgarenko V., Olgarenko I., Olgarenko V.I. Justification of methodological approaches to standardisation of irrigation as an element of resource saving and minimization of the anthropogenic load on agrobiocenosis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 337. Issue 1. P. 012027. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012027
2. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. Issue 3. P. 022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060
3. Ткачев А.А., Ольгаренко И.В. Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–23. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN NTRFMJ.
4. Tas E., Ağralioğlu N. Comparison of friction losses in long polyethylene pipe systems using different

formulas // International Symposium on Urban Water and Wastewater Management. 2018. Pp. 602–609.

5. Abduro S., Sreenivasu G. Assessments of urban water supply situation of Adama Town, Ethiopia // Journal of Civil Engineering Research. 2020. Vol. 10. Issue 1. Pp. 20–28. DOI: 10.5923/j.jce.20201001.03

6. Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S. Design optimization of water distribution suburban area in Mranggen, Semarang, Indonesia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 448. Issue 1. P. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066

7. Terlumuna U.J., Ekwule O.R. Evaluation of municipal water distribution network using watercard and watergems // Journal of Engineering and Sciences. 2019. Vol. 5. Issue 2. Pp. 147–156.

8. Bhaskar S.P., Rout A.K., Rajendra G.M. Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal City using WaterGems Software // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering

and Technology. 2017. Vol. 6. Issue 7. DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0607132

9. *Arunjyoti S., Senapati S., Sirisha A.* A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems // *African Journal of Agricultural Research*. 2016. Vol. 11. Issue 8. Pp. 683–692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648

10. *Шмеленко Б.Г.* Техничко-экономические проблемы применения полимерных трубопроводов в мелиорации и в водном хозяйстве // *Полимерные трубы*. 2011. Т. 34. № 4. С. 35–37.

11. *Митрахович А.И., Макоед В.М., Сергеев А.П., Лавушев С.М.* Из опыта применения на осушительных системах коллекторов из труб большого диаметра // *Мелиорация*. 2019. № 2 (88). С. 13–17. EDN CCYDWN.

12. *Митрахович А.И., Макоед В.М., Лавушев С.М., Сергеев А.П.* Условия применения двухслойных гофрированных полиэтиленовых труб «корсис» на мелиоративных объектах // *Мелиорация*. 2020. № 1 (91). С. 15–23. EDN FYKDWT.

13. *Rubeiz C.* Case studies on the use of HDPE pipe for municipal and industrial projects in North America // *Pipeline Division Specialty Congress*. 2004. DOI: 10.1061/40745(146)22

14. *Hajibabaei M., Nazif S., Sereshgi F.T.* Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 43. Pp. 538–549. DOI: 10.1016/j.scs.2018.09.014

15. *Diogo A.F., Vilela F.A.* Head losses and friction factors of steady turbulent flows in plastic pipes // *Urban Water Journal*. 2014. Vol. 11. Issue 5. Pp. 414–425. DOI: 10.1080/1573062X.2013.768682

16. *Боровков В.С., Байков В.Н., Писарев Д.В., Волынов М.А.* Локальное подобие течения и распределение скоростей в турбулентных потоках // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 6 (32). С. 12–19. DOI: 10.5862/MCE.32.2. EDN PDZKDX.

17. *Heller V.* Scale effects in physical hydraulic engineering models // *Journal of Hydraulic Research*. 2011. Vol. 49. Issue 3. Pp. 293–306. DOI: 10.1080/00221686.2011.578914

18. *Kim J.H., Kwon S.H., Yoon K.S., Lee D.H., Chung G.* Hydraulic experiment for friction loss coefficient in non-circular pipe // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 154. Pp. 773–778. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.582

19. *Leopardi M.* On roughness similarity of hydraulic models // *Journal of Hydraulic Research*. 2004. Vol. 42. Issue 3. Pp. 239–245. DOI: 10.1080/00221686.2004.9728389

20. *Ивановский Ю.К., Моргунов К.П., Рябов Г.Г.* Лабораторные исследования автодорожного водопропускного сооружения // *Вестник государствен-*

ного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 2. С. 318–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330. EDN UPZIVA.

21. *Моргунов К.П., Ивановский Ю.К., Баранов А.Ю.* Экспериментальное определение коэффициента шероховатости металлических спирально-витых гофрированных труб // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2020. Т. 12. № 2. С. 323–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335. EDN VRMTTG.

22. *Yu X.G., Choi K.Y.* Systematic and exact scaling analysis of the single-phase natural circulation flow: The hydraulic similarity // *Progress in Nuclear Energy*. 2016. Vol. 89. Pp. 78–87. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.02.001

23. *Аношкин Ю.И., Добров А.А., Легчанов М.А., Субарев М.А., Хробостов А.Е.* Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления вставок из упруго-пористого проволоочного материала в канале круглого сечения // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2019. № 1 (124). С. 92–99. DOI: 10.46960/1816-210X_2019_1_92. EDN ZANGJF.

24. *Алтуниин В.И., Черных О.Н.* О гидравлическом расчете дорожных водопропускных труб из гофрированного металла // *Дороги и мосты*. 2015. Т. 1 (33). С. 234–247. EDN UYBLMB.

25. *Алтуниин В.И., Черных О.Н., Федотов М.В.* Водопропускные трубы в транспортном строительстве. Гидравлическая работа труб из металлических гофрированных структур : монография. М. : МАДИ, 2012. 240 с. EDN RFEAET.

26. *Черных О.Н., Алтуниин В.И., Бурлаченко А.В.* Повышение эффективности гидравлической работы дорожных водопропускных труб // *Природообустройство*. 2016. № 2. С. 42–47. EDN WAAEWB.

27. *Ханов Н.В., Бурлаченко А.В.* Гидравлические аспекты обеспечения надежной и безопасной работы трубчатых водопропускных сооружений из гофрированного металла // *Природообустройство*. 2016. № 5. С. 32–39. EDN XHZZPJ.

28. *Боровков В.С., Брянская Ю.В., Байков В.Н.* Уточнение условий подобия равномерных широких открытых потоков при гидравлическом моделировании недеформируемых каналов // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2009. Т. 253. С. 22–27. EDN KYQUIL.

29. *Воронов Ю., Пугачев Е., Перевозникова Е.* Гидравлические основы расчета водоотводящих самотечных трубопроводов из пластмассовых труб // *Полимерные трубы*. 2006. № 3 (12). С. 38–41. EDN ZVHTMF.

Поступила в редакцию 27 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 24 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 10 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Львович Зуйков** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 569091, Scopus: 6603349753, ResearcherID: B-9751-2016, ORCID: 0000-0003-1468-3335; hydroprof3fl@yandex.ru;

Назира Тентимишовна Джумагулова — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-0586-9464; dnazira@rambler.ru;

Абдуламир Лейс Саид Абдуламир — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; преподаватель кафедры нефтяной инженерии; **Университет Кербелы**; г. Кербела, Ирак; ORCID: 0000-0001-5317-4299; laith_eng2009@yahoo.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Olgarenko G., Olgarenko V., Olgarenko I., Olgarenko V.I. Justification of methodological approaches to standardisation of irrigation as an element of resource saving and minimization of the anthropogenic load on agrobiocenosis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 337(1):012027. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012027
2. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 698(3):022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060
3. Tkachyev A.A., Olgarenko I.V. Urgent problems of water distribution management in main canals of irrigation systems. *Scientific journal of the Russian Research Institute for Land Reclamation Problems*. 2021; 11(2):1-23. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN NTRFMJ. (rus.).
4. Tas E., Ağralıoğlu N. Comparison of friction losses in long polyethylene pipe systems using different formulas. *International Symposium on Urban Water and Wastewater Management*. 2018; 602-609.
5. Abduro S., Sreenivasu G. Assessments of urban water supply situation of Adama Town, Ethiopia. *Journal of Civil Engineering Research*. 2020; 10(1):20-28. DOI: 10.5923/j.jce.20201001.03
6. Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S. Design optimization of water distribution suburban area in Mranggen, Semarang, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 448(1):012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066
7. Terlumuna U.J., Ekwule O.R. Evaluation of municipal water distribution network using Watercard and Watergems. *Journal of Engineering and Sciences*. 2019; 5(2):147-156.
8. Bhaskar S.P., Rout A.K., Rajendra G.M. Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal City using WaterGems Software. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017; 6(7). DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0607132
9. Arunjyoti S., Senapati S., Sirisha A. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. *African Journal of Agricultural Research*. 2016; 11(8):683-692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648
10. Shtepa B.G. Technical and economic problems of the use of polymer pipelines in land reclamation and water management. *Polymer Pipes*. 2011; 34(4):35-37. (rus.).
11. Mitrakhovich A.I., Makoed V.M., Sergeenya A.P., Lavushev S.M. From the experience of large diameter pipes usage for drainage systems. *Reclamation*. 2019; 2(88):13-17. EDN CCYDWN. (rus.).
12. Mitrakhovich A.I., Makoed V.M., Lavushchev S.M., Sergeenya A.P. Conditions of application of two-layer corrugated polyethylene pipes “Corsis” on meliorative objects. *Reclamation*. 2020; 1(91):15-23. EDN FYKDWT. (rus.).
13. Rubeiz C. Case Studies on the Use of HDPE pipe for municipal and industrial projects in North America. *Pipeline Division Specialty Congress*. 2004. DOI: 10.1061/40745(146)22
14. Hajibabaei M., Nazif S., Sereshgi F.T. Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact. *Sustainable Cities and Society*. 2018; 43:538-549. DOI: 10.1016/j.scs.2018.09.014
15. Diogoa A.F., Vilela F.A. Head losses and friction factors of steady turbulent flows in plastic pipes. *Urban Water Journal*. 2014; 11(5):414-425. DOI: 10.1080/1573062X.2013.768682
16. Borovkov V.S., Baykov V.N., Pisarev D.V., Volynov M.A. Local flow similarity and velocity distribution in turbulent flows. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 6(32):12-19. DOI: 10.5862/MCE.32.2. EDN PDZKDX. (rus.).

17. Heller V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(3):293-306. DOI: 10.1080/00221686.2011.578914
18. Kim J.H., Kwon S.H., Yoon K.S., Lee D.H., Chung G. Hydraulic experiment for friction loss coefficient in non-circular pipe. *Procedia Engineering*. 2016; 154:773-778. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.582
19. Leopardi M. On roughness similarity of hydraulic models. *Journal of Hydraulic Research*. 2004; 42(3):239-245. DOI: 10.1080/00221686.2004.9728389
20. Ivanovskiy Yu.K., Morgunov K.P., Ryabov G.G. Laboratory investigations of road water freight construction. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2018; 10(2):318-330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330. EDN UPZIVA. (rus.).
21. Morgunov K.P., Ivanovsky Yu.K., Baranov A.Yu. Experimental determination of the roughness coefficient of metal spirally-twisted corrugated pipes. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2020; 12(2):323-335. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-323-335. EDN VRMTTG. (rus.).
22. Yu X.G., Choi K.Y. Systematic and exact scaling analysis of the single-phase natural circulation flow: The hydraulic similarity. *Progress in Nuclear Energy*. 2016; 89:78-87. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.02.001
23. Anoshkin Yu.I., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Subarev M.A., Khrobostov A.E. Experimental investigations of hydraulic resistance of inserts from elastic-porous wire material in round channel. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*. 2019; 1(124):92-99. DOI: 10.46960/1816-210X_2019_1_92. EDN ZANGJF. (rus.).
24. Altunin V.I., Chernykh O.N. On the hydraulic calculation of road culverts made of corrugated metal. *Roads and Bridges*. 2015; 1(33):234-247. EDN UYBLMB. (rus.).
25. Altunin V.I., Chernykh O.N., Fedotov M.V. *Culverts in transport construction. Hydraulic operation of pipes from metal corrugated structures : monograph*. Moscow, MADI, 2012; 240. EDN RFEAET. (rus.).
26. Chernykh O.N., Altunin V.I., Burlachenko A.V. Increase of effectiveness of the hydraulic operation of road culvert pipes. *Environmental Engineering*. 2016; 2:42-47. EDN WAAEWB. (rus.).
27. Khanov N.V., Burlachenko A.V. Hydraulic aspects of ensuring reliable and safe operation of tubular corrugated culverts. *Environmental Engineering*. 2016; 5:32-39. EDN XHZZPJ. (rus.).
28. Borovkov V.S., Brianskaya Yu.V., Boikov V.N. Correction of similarity conditions of uniform wide open flows with hydraulic modeling of not deformable channels. *Proceedings of the VNIIG*. 2009; 253:22-27. EDN KYQUIL. (rus.).
29. Voronov Y., Pugachev E., Perevoznikova E. Hydraulic basis of calculation of water gravious flow pipelines from plastic pipes. *Polymer Pipes*. 2006; 3(12):38-41. EDN ZVHTMF. (rus.).

Received October 27, 2023.

Adopted in revised form on December 24, 2023.

Approved for publication on January 10, 2024.

B I O N O T E S : **Andrey L. Zuykov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 569091, Scopus: 6603349753, ResearcherID: B-9751-2016, ORCID: 0000-0003-1468-3335; hydroprof3fl@yandex.ru;

Nazira T. Dzhumagulova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dnazira@rambler.ru;

Abdulameer Layth Saeed Abdulameer — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lecturer Department of Petroleum Engineering; **University of Karbala**; Karbala, Iraq; ORCID: 0000-0001-5317-4299; laith_eng2009@yahoo.com.

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

The authors declare no conflicts of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.4:69.059

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.811-825

Организационно-экономические аспекты ремонта жилых домов с декоративными элементами на крыше

Татьяна Евгеньевна Гордеева, Ольга Анатольевна Мамаева

Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается проблема сохранения декоративных элементов на крышах жилых многоквартирных домов (МКД). Отмечается историческая и архитектурная ценность таких конструкций в создании облика города. Проводится анализ текущего технического состояния декоративных элементов крыш на примере отдельных МКД в Самаре и на основе комплексного анализа даются рекомендации по их дальнейшей эксплуатации. Проблематика исследуется на примере города Самара и, соответственно, основывается на практической базе указанного города. Вместе с тем поставленные в статье вопросы и предложения актуальны и могут быть распространены на жилую застройку большинства российских городов. Это обусловлено тем, что организационно-правовое поле данной проблемы устанавливается на уровне федерального законодательства, а в регионах получает свое развитие только в форме не самых существенных особенностей.

Материалы и методы. При разработке настоящей проблематики применен комплекс общепринятых научно-исследовательских методов — наблюдение, сравнение, измерение, абстрагирование — в адаптации к объекту и предмету изучения. Исследование опирается на материалы и результаты собственных авторских исследований в отношении технических, стоимостных и нормативно-правовых параметров ремонта декоративных элементов плоских крыш многоквартирных МКД, выполненных по типовому и индивидуальному проекту в городе Самара.

Результаты. Проанализирована нормативно-правовая база, действующая в отношении капитального ремонта общего имущества МКД. Выявлены дефекты и проблемы — коррозия металлических конструкций, разрушение деревянных элементов. Оценивается влияние демонтажа конструкций на внешний вид зданий. Дается сравнительная оценка стоимости ремонта и восстановления элементов крыш. Анализируется действующая нормативно-правовая база проведения капитального ремонта в МКД. Отмечается отсутствие четкого регулирования финансирования работ по ремонту рассматриваемых конструкций крыш. Определяется сметная стоимость капитального ремонта дополнительных элементов крыш по альтернативным вариантам его производства. Делается вывод о необходимости комплексного подхода с учетом технического состояния, финансовых возможностей и правового регулирования для решения обозначенной проблемы.

Выводы. Внесены предложения по совершенствованию нормативно-методического и нормативно-технического механизмов для обеспечения сохранности ценных в историко-архитектурном плане элементов крыш и безопасной эксплуатации МКД в Самаре.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектурная выразительность, безопасная эксплуатация, историко-архитектурная ценность, капитальный ремонт, малые архитектурные элементы, нормативный инструмент, организационно-экономический механизм, физический износ, финансирование

Благодарности. Авторы благодарят авторов сайта (URL: https://drugoigorod.ru/cultural_layer_shanghai/) за исторические сведения о зданиях города Самара. В статье использована фотография с указанного сайта.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гордеева Т.Е., Мамаева О.А. Организационно-экономические аспекты ремонта жилых домов с декоративными элементами на крыше // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 811–825. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.811-825

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Евгеньевна Гордеева, ftgs-sgasu@mail.ru.

Organizational and economic aspects of residential buildings renovation with decorative elements on the roof

Tatiana E. Gordeeva, Olga A. Mamaeva

Samara State Technical University (SamGTU); Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problem of preservation of decorative elements on the roofs of multi-apartment residential buildings is considered. The authors note the historical and architectural value of such structures in creating the appearance of the city.

An analysis of the current technical condition of decorative elements of roofs is carried out using the example of individual apartment buildings in Samara and, based on a comprehensive analysis, recommendations are given for their further operation. The problematics is investigated by the authors using the example of Samara city and, accordingly, are based on the practical basis of this city. At the same time, the questions and proposals posed in the paper are relevant and can be extended to the residential development of most Russian cities. This is due to the fact that the organizational and legal field of this problem is established at the level of federal legislation, and in the regions it develops only in the form of not the most significant features.

Materials and methods. When developing the present problem, the authors used a set of generally accepted research methods — observation, comparison, measurement, abstraction — in adaptation to the object and subject of research. The research is based on the materials and results of the author's own research in relation to technical, cost and regulatory parameters of the repair of decorative elements of flat roofs of multi-apartment high-rise buildings, made according to a standard and individual project in Samara city.

Results. The regulatory and legal framework in force in relation to the overhaul of the common property of an apartment building is analyzed. Defects and problems were identified — corrosion of metal structures, destruction of wooden elements. The impact of dismantling of structures on the appearance of buildings is assessed. A comparative assessment of the cost of repair and restoration of roof elements is given. The current regulatory framework for overhaul in apartment buildings is analyzed. It is noted that there is no clear regulation of financing the repair of the roof structures under consideration. The estimated cost of overhaul of additional roof elements is determined according to alternative options for its production. The conclusion is made about the need for an integrated approach, taking into account the technical condition, financial capabilities and legal regulation to solve the identified problem.

Conclusions. Proposals are made to improve the normative-methodical and normative-technical mechanisms to ensure the safety of historically and architecturally valuable elements of roofs and the safe operation of apartment buildings in Samara.

KEYWORDS: architectural expressiveness, safe operation, historical and architectural value, major repairs, small architectural elements, regulatory instrument, organizational and economic mechanism, physical wear and tear, financing

Acknowledgements. The authors thank the authors of the site (URL: https://drugoigorod.ru/cultural_layer_shanghai/) for historical information about the buildings) of the city of Samara. The article used a photo from the specified site.

FOR CITATION: Gordeeva T.E., Mamaeva O.A. Organizational and economic aspects of residential buildings renovation with decorative elements on the roof. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):811-825. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.811-825 (rus.).

Corresponding author: Tatiana E. Gordeeva, ftgs-sgasu@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурный облик города — это комплексные и взаимосвязанные элементы конструктивного, графического и визуального восприятия городской среды, включающие в себя здания, улицы, площади, скверы, парки, набережные, мосты, градостроительные комплексы и другие элементы. Эти элементы, взаимодействуя друг с другом, создают уникальную атмосферу каждого города, его идентичность и характер [1].

В разные периоды архитекторы и строители, желая выразить и подчеркнуть особенности эпохи, украшали фасады и крыши зданий конструктивным декором [1].

Так, здания 30–60-х гг. XX в. отличаются наличием декоративных элементов под балконными плитами, декоративными карнизами, малыми архитектурными формами (МАФ) на крышах.

Позже в целях максимального увеличения жилой площади многоквартирных домов (МКД) и обеспечения горожан отдельными квартирами декоративные элементы фасадов и крыш вновь строящихся зданий упрощаются, а чаще и вовсе исчезают. Здания приобретают типовые характеристики.

С 70-х гг. в жилищном строительстве увеличивается количество многоэтажных зданий. Скатные крыши заменяются на плоские с внутренним водоотводом. МАФ на них выполняются редко, однако в зданиях 70-х гг. постройки их можно встретить.

Это можно объяснить стремлением архитекторов привнести красоту в практичность типовых жилищ и сберечь городской облик, заполняемый бесликими пятиэтажными «хрущевками».

Примечательным и, можно сказать, «имиджевым» объектом для центральной Самары в 70–80-х гг. и по сей день является градостроительный комплекс «Шанхай». Так в народе прозвали единый комплекс зданий протяженностью более 500 м, состоящий из домов № 207А, 209, 211, 213 и 215 по ул. Молодогвардейская, № 9 — по ул. Полевая и № 214 — по ул. Галактионовская.

Известные архитекторы Борис Блохин и Ваган Каркарьян начали проектировать «Шанхай» в 1968 г., построили комплекс только к 1976 г. По мнению экс-главного архитектора Самары Виталия Стадникова, «Шанхай» является представителем советского модернизма. Цитируя В. Стадника: «Авторы спроектировали «идеальный дом» — жилкомбинат, когда человек может, по сути, никуда не выходить за пределы двора. Здесь расположены собственный сквер, детский сад, спортивная площадка, продуктовый и вещевой магазины, аптека и почта»¹.

Дополнительную функциональность и архитектурную выразительность зданиям комплекса по задумке авторов должны были придать элементы крыши — деревянные навесы-перголы, которые

¹ Самарский «Шанхай». URL: <https://www.samara.kp.ru/daily/26630/3649887/>

напоминают сейчас о невоплощенной в жизнь идее архитекторов замостить крышу и сделать из нее прогулочную зону (рис. 1).

Прогулочного «Бродвея» на крыше не случилось, а оставшиеся навесы-перголы стали ассоциироваться у жильцов с китайскими крышами. Кроме того, для своего времени комплекс был одним из самых густозаселенных домов в Самаре. Визуальные отсылки к китайским крышам и сходство по числу жителей с самым крупным по численности населения китайским городом определили кварталу собственное имя — «Шанхай».

В то же время (в 1976 г.) в Самаре возвели первый в городе 16-этажный жилой МКД по ул. Осипенко, 2а (рис. 2). И вновь с дополнительными элементами на крыше. Так, на помещении машинного отделения лифта на крыше здания установлена металлическая рама, на которой закреплены деревянные планки.

Данный проект стал типовым, позднее по нему построено много зданий в Самаре (ул. Осипенко, ул. Ново-Садовая, пр-т Кирова, ул. Дачная и др. (рис. 3–6)). На каждом из них согласно проекту установлена металлическая рама с деревянными планками по периметру.

В связи с тем, что конструктивно-декоративные элементы крыш жилых домов города Самара, некогда призванные украсить его архитектурный облик,

на сегодня «эксплуатируются» более 40 лет, следует обратить внимание на такие факты, как:

- отсутствие в отношении них поддерживающих мероприятий в рамках текущего ремонта, содержания и обслуживания жилых домов;
- утрата эстетической ценности;
- угроза безопасности зданиям и жителям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научную основу исследования составили труды российских и зарубежных ученых преимущественно за последние пять лет из области изучения вопросов технологической и экономической эффективности капитального ремонта жилых МКД.

Наибольшее внимание в публикациях российских и зарубежных коллег уделяется технологическим вопросам капитального ремонта [2–11]. Менее популярными в изученных авторами опубликованных трудах являются организационные вопросы и проблемы капитального ремонта общего имущества в МКД [12–14]. Отдельные труды, использованные авторами в целях настоящего исследования, посвящены анализу нормативно-методической базы капитальных ремонтов МКД и иных объектов [15, 16]. Наиболее ценными в контексте специфики настоящей статьи стали публикации, в которых акцентируются вопросы архитектурной выразитель-



Рис. 1. Металлические конструкции стоек перголы на крыше комплекса «Шанхай» (вид с ул. Молодогвардейская, 2023 г.)

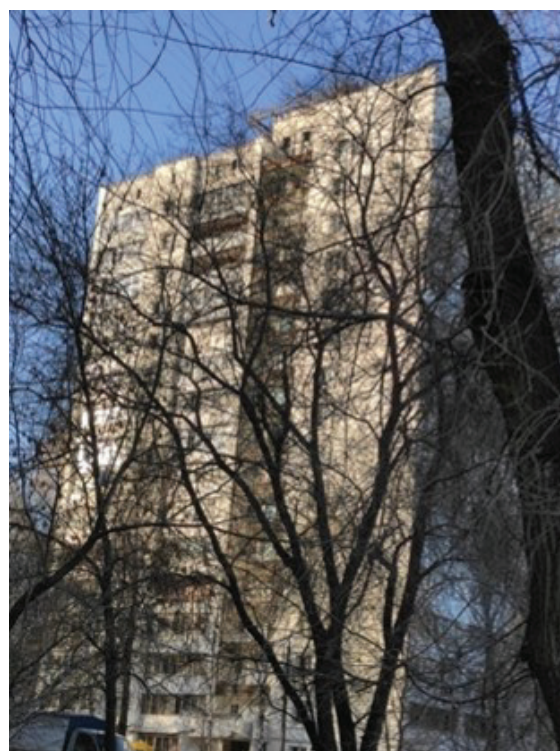
Fig. 1. Metal structures of pergola posts on the roof of the Shanghai complex (view from Molodogvardeyskaya street, 2023)



Рис. 2. Декоративная конструкция на крыше дома по ул. Осипенко (фото 2023 г.)
Fig. 2. Decorative design on the roof of a house in Osipenko Street (photo 2023)



a



b

Рис. 3. Вид на МКД по ул. Осипенко, 2а: *a* — со стороны набережной; *b* — со стороны тротуара вдоль дома
Fig. 3. View of the MFH along Osipenko Street, 2a: *a* — from the embankment; *b* — from the sidewalk along the house



Рис. 4. Вид на жилые дома по ул. Осипенко со стороны р. Волга (графически выделены элементы на крышах)

Fig. 4. View of residential buildings along Osipenko street from the river Volga (elements on the roofs are graphically highlighted)

ности и ценности объектов, а главное — элементов, обеспечивающих ее [17, 18]. При формировании авторской позиции по представленным в статье проблемам и предложениям определенную полезность

имело знакомство с работами из зоны смежных научных интересов, связанных с реновацией городской среды в целом и отдельных объектов в частности [19].



a



b

Рис. 5. Вид: *a* — на здания по ул. Ново-Садовая; *b* — с улицы Дачная

Fig. 5. View: *a* — of the buildings along Novo-Sadovaya Street; *b* — from Dachnaya Street

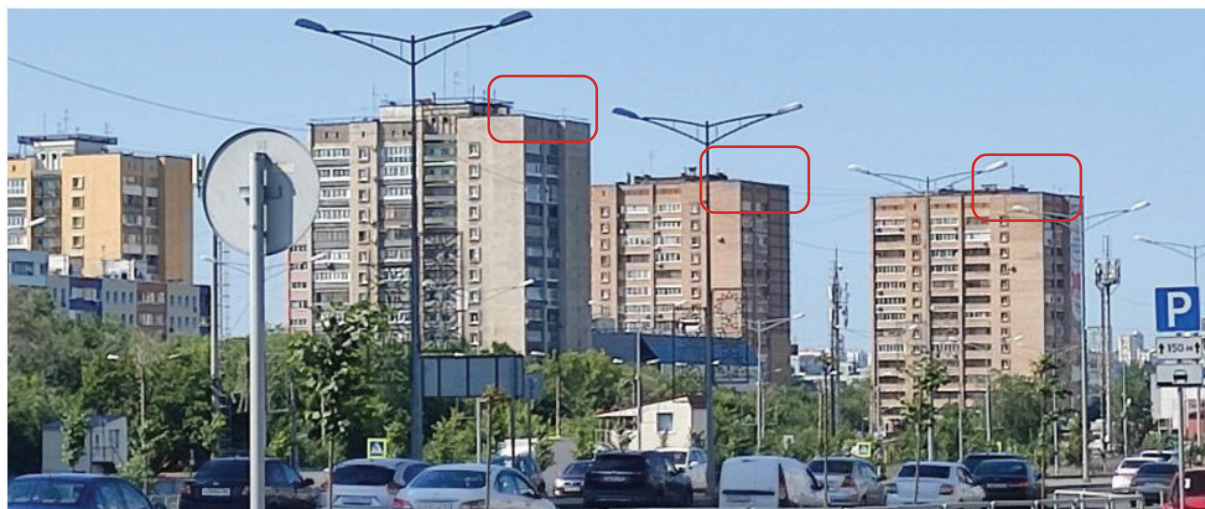


Рис. 6. Вид на МКД по проспекту Кирова со стороны Московского шоссе

Fig. 6. View of the MFH along Kirov Avenue from Moskovskoe highway

Научный обзор опубликованных материалов российских и зарубежных коллег позволяет сделать выводы о широком интересе к проблематике различных аспектов капитального ремонта в широком смысле и вместе с тем недостатке исследовательского внимания к конкретным проблемам и элементам процесса капитального ремонта. По этой причине именно последние были выбраны авторами предметом для комплексного изучения в настоящей работе.

В работе авторами использован комплексный метод исследования, сочетающий эмпирический (наблюдение, сравнение, измерение) и теоретический (анализ, абстрагирование, моделирование) подходы.

Объектами исследования стали декоративные элементы жилых МКД, выполненных по типовым и индивидуальным проектам.

Изучена историко-архитектурная ценность зданий. Проанализировано внешнее восприятие каждого здания и его влияние на архитектурный облик городской застройки.

Оценено техническое состояние декоративных элементов.

Определена сметная стоимость ремонта базисно-индексным методом в текущем уровне цен (2 квартал 2023 г.) в соответствии с положениями Методики² с использованием программного продукта Estimate 2.0.

² Об утверждении Методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации : Приказ Минстроя России от 04.08.2020 № 421/пр (ред. 07.07.2022) // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_362957/

Проанализирована нормативно-правовая база, действующая в отношении капитального ремонта общего имущества МКД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты наблюдений и оценки авторами текущего состояния декоративных элементов крыш отдельных жилых домов приведены на рис. 7, 8.

Например, состояние конструкций над машинным отделением лифтов на крышах типовых 16-этажных жилых домов по ул. Осипенко следующее (рис. 3): металлическая рама имеет многочисленные следы ржавчины, часть деревянных планок отсутствует, часть планок утратила прочное крепление с рамой, древесина оставшихся планок рассохлась, часть конструкции с отмеченными дефектами расположена над входом в здание. В доме 26 по ул. Осипенко отмечается раскачивание металлической рамы под воздействием ветров со стороны Волги, что вкпе с длительным отсутствием качественного покрытия на крыше машинного отделения лифта приводит к разрушению кирпичной кладки стен машинного отделения.

Текущее техническое состояние конструкций на крыше типового жилого дома по ул. Дачной (рис. 8) аналогично домам на ул. Осипенко (рис. 7) — металлическая рама проржавела, большинство деревянных планок отсутствует, оставшиеся планки рассохлись и утратили прочное крепление с рамой, при этом конструкция с дефектами «типично» расположена над подъездом.

Таким образом, декоративные элементы крыш со временем не только утратили свои эстетические свойства, но и не отвечают требованиям технического регламента по механической безопасности



a



b

Рис. 7. Текущее состояние декоративных элементов крыши по ул. Осипенко, д. 2б: *a* — деревянные планки рассохлись, частично отсутствуют, металлические балки покрыты ржавчиной, кирпичная кладка в местах крепления декоративного элемента имеет сколы; *b* — техническое состояние

Fig. 7. The current state of decorative roof elements along Osipenko Street, 2b: *a* — the wooden planks have cracked, are partially missing, the metal beams are covered with rust, the brickwork in the places where the decorative element is attached is chipped; *b* — technical condition

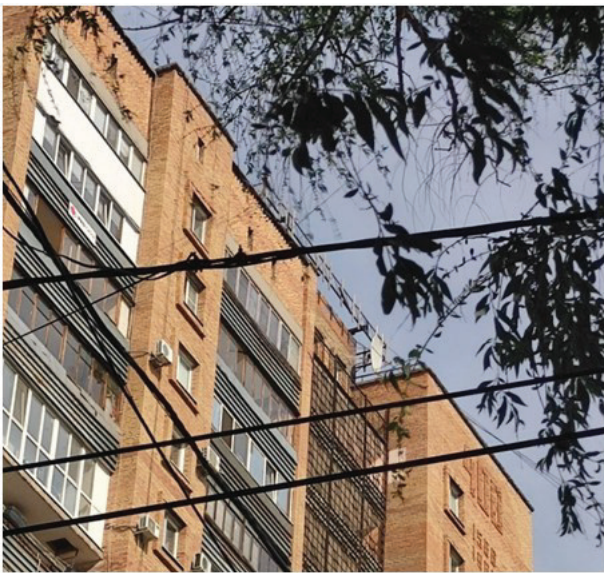


Рис. 8. Текущее состояние декоративных элементов крыши по ул. Дачная (отсутствует более половины деревянных планок)

Fig. 8. The current state of decorative roof elements along Dachnaya Street (more than half of the wooden planks are missing)

и безопасности пользователей зданий и сооружений (ст. 7, 10–11)³.

Результаты наблюдений и обследований, выполненных авторами на примере рассмотренных выше МКД (рис. 2–6), справедливо распространить на подавляющее большинство длительно эксплуатируемых жилых зданий с аналогичными конструктивно-декоративными элементами.

Ремонт такой конструкции на крыше потребует выполнения следующих видов работ:

- укрепление кирпичной кладки в местах крепления рамы;
- очистка от ржавчины металлического каркаса;
- демонтаж поврежденных деревянных реек;
- установка новых реек;
- окраска и антикоррозийная обработка металлической рамы.

Обследование конструкций перголы на крышах «Шанхая» (см. рис. 9) показало следы ржавчины на металлических конструкциях стоек местами, но состояние металлических элементов в целом можно признать удовлетворительным. Отсутствие проектного деревянного настила на конструкции навеса-перголы отмечалось с момента ввода зданий в эксплуатацию (рис. 9, а), в связи с чем функция эксплуатируемой кровли с прогулочными зонами никогда ею не выполнялась. Однако на большей части крыши настил изначально был уложен (рис. 9, б), но в настоящее время демонтирован по всей крыше (рис. 9, в). При этом в отличие от рассмотренного нами выше ряда 16-этажных типовых домов отсутствие этих конструкций на крыше не оказывает влияния на безопасность зданий и пользователей, а влияет лишь на искажение архитектурного облика в сравнении с задумкой авторов проекта.

Здесь следует сказать, что оба рассмотренных авторами случая — и МАФ на крышах типовых 16-этажек, и изначально не доведенные до проектного состояния конструкции перголы на крышах «Шанхая» — сейчас требуют комплексных организационно-экономических решений, определяющих их дальнейшую «судьбу».

При этом предпосылки и причины необходимости таких решений различны: обеспечение эксплуатационной безопасности в случае декоративных конструкций на крышах типовых жилых домов и придание эстетики и дополнительного функционала крышам градостроительного комплекса «Шанхай».

С целью оценки объемов финансирования предложенных выше решений по капитальному ремонту дополнительных конструкций крыш типовых

16-этажек и жилого комплекса «Шанхай» авторами определена сметная стоимость капитального ремонта по альтернативным вариантам его производства.

Результаты расчета сметной стоимости капитального ремонта дополнительных элементов крыш МКД приведены в таблице.

Следует заметить, что пергола на крыше комплекса Шанхай является неотъемлемой частью истории зданий. Хорошо просматривается со стороны придомовой территории. И хотя даже при строительстве не была на крыше устроена пешеходная зона, отсутствие перголы на крыше сильно ухудшит внешний облик объекта.

Если рассмотреть типовой проект первого в Самаре 16-этажного дома, который многократно использован в городской застройке, то можно отметить, что конструкция на крыше не просматривается со стороны тротуара (рис. 3) и не является акцентом при визуализации зданий со стороны р. Волги (рис. 4). Не видна конструкция и с тротуара, и у домов по ул. Ново-Садовая (рис. 5, а), Дачная (рис. 5, б), Московского шоссе (рис. 6).

Очевидно, что отсутствие данного украшения не изменит облик здания и позволит его дальнейшую безопасную эксплуатацию без него.

Это может послужить основанием для признания этих конструкций не представляющими историко-архитектурной (эстетической) ценности. Таким образом, минимальные затраты на демонтаж дополнительных конструкций крыш типовых 16-этажных МКД, необходимые для обеспечения безопасной эксплуатации зданий, составят 56,74 тыс. руб.

В случае решения о полном восстановлении дополнительных конструкций объем затрат удвоится (до 115,85 тыс. руб.), а необходимость выполнения работ в ближайшее время сохранится.

С восстановлением до проектного состояния и функционала конструкций перголы на крыше жилого комплекса «Шанхай» затратная составляющая гораздо более значительная — 4614, 44 тыс. руб.

Ключевые сложности в решении проблем сохранения (устранения, ремонта) декоративных элементов и МАФ на крышах и фасадах жилых МКД обуславливаются, в первую очередь, нормативно-правовыми регуляторами, действующими в отношении капитального ремонта общего имущества МКД.

В соответствии со ст. 166 Жилищного кодекса РФ (далее — ЖК РФ)⁴ ремонт крыши включен в перечень услуг и (или) работ по капитальному ремонту общего имущества в МКД, оказание и (или) выполнение которых финансируются за счет средств фонда капитального ремонта (далее — ФКР), сфор-

³ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/

⁴ Жилищный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 188-ФЗ (ред. от 24.06.2023). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51057/41d388ff42a6125921acb1c8d36071ff5d8b238d/

Сметная стоимость капитального ремонта дополнительных элементов крыш МКД
Estimated cost of major repairs of additional elements of roofs of apartment buildings

Вид ремонта Repair type	Состав работ / Scope of work	Сметная стоимость (2 квартал 2023 г.), руб. / Estimated cost (2 quarter 2023), rub
<i>МКД по ул. Осипенко, 2б (и аналогичные типовые МКД) / 2b Osipenko St. MFH (and similar standard MFH)</i>		
Восстановление конструкции Restoration of the structure	- укрепление кирпичной кладки в местах крепления рамы reinforcing the brickwork in the frame fixing points; - очистка от ржавчины металлического каркаса / cleaning of the metal frame from rust; - демонтаж поврежденных деревянных реек / dismantling of damaged wooden laths; - установка новых реек / installation of new laths; - окраска и антикоррозийная обработка металлической рамы / painting and anti-corrosion treatment of the metal frame; - огнебиозащита деревянных конструкций / fire-bio-protec- tion of wooden structures	115 855,00
Демонтаж конструкции Dismantling of the structure	- демонтаж деревянных конструкций / dismantling of wooden structures; - демонтаж металлических конструкций / metal dismantling	56 743,00
<i>Жилой комплекс «Шанхай» / Residential complex “Shanghai”</i>		
Восстановление конструкции до проектного состояния Restoration of the structure to its design condition	- очистка от ржавчины и прочего металлических балок cleaning of metal beams from rust and other things; - окраска и антикоррозийная обработка металлических ба- лок / painting and anti-corrosion treatment of metal beams; - демонтаж деревянных балок / dismantling of wooden beams; - установка новых балок / installation of new beams; - укладка деревянного настила на балки / laying of wooden flooring on the beams; - огнебиозащита деревянных конструкций / fire-bio-protec- tion of wooden structures	4 614 439,00

мированного исходя из минимального размера взно-
са на капитальный ремонт в субъекте РФ.

При этом ЖК РФ наделяет субъекты РФ правом
утверждать на региональном уровне соответствующим
нормативным актом состав таких работ и (или)
услуг, в том числе дополнительных к установленно-
му их перечню (например, работ по переустройству
невентилируемой крыши на вентилируемую крышу,
устройству выходов на кровлю). В развитие поло-
жений ст. 116 ЖК РФ Минстроем России рекомен-
довано в нормативный правовой акт субъекта РФ,
устанавливающий состав работ и (или) услуг по ка-
питальному ремонту общего имущества в МКД
за счет средств ФКР, для капитально ремонта крыш
предусматривать позицию «установка и (или) вос-
становление имущества, демонтированного или раз-

⁵ Об утверждении методических рекомендаций по опреде-
лению нормативным правовым актом субъекта Российской
Федерации услуг и (или) работ, входящих в число услуг
и (или) работ по капитальному ремонту общего имущества
в многоквартирном доме, оказание и (или) выполнение ко-
торых финансируются за счет средств фонда капитального

рушенного вследствие технологических и конструк-
тивных особенностей ремонтируемых (заменяемых)
конструкций, установленных по строительному
проекту многоквартирного дома»⁵.

Включение такой позиции в «региональный»
состав работ по ремонту крыш МКД (и соответ-
ственно в предельную стоимость и размер мини-
мального взноса) нивелировало бы сразу две про-
блемы:

- проблему неопределенности статуса работ
по ремонту рассматриваемых в настоящей статье
декоративных элементов крыш, поскольку закреп-
ило бы их однозначное отнесение к капитальному
ремонту крыши;
- проблему источника финансирования этого
капитального ремонта, поскольку он определенно

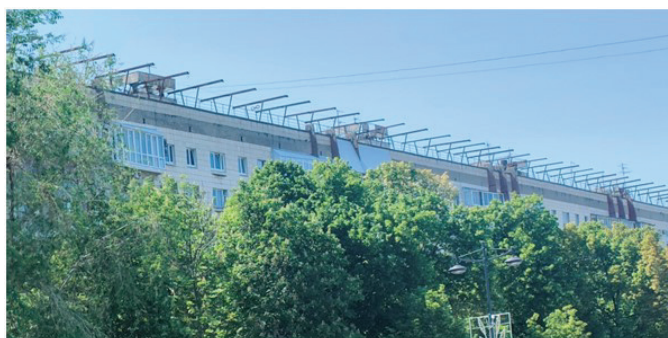
ремонта, который сформирован исходя из минимального
размера взноса на капитальный ремонт, и которые включе-
ны в перечень, указанный в части 1 статьи 166 Жилищного
кодекса : Приказ Минстроя России от 29.12.2022 г. № 1159/
пр // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL:
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_437080/



a



b



c

Рис. 9. Конструкции перголы на крышах «Шанхая»: *a* — отсутствуют деревянные балки навеса; *b* — конструктивное решение⁶; *c* — отсутствуют опорные балки на стойках

Fig. 9. Pergola structures on the roofs of “Shanghai”: *a* — there are no wooden canopy beams; *b* — design solution⁵; *c* — there are no support beams on the racks

⁶ Другой город. URL: https://drugoigorod.ru/cultural_layer_shanghai/

устанавливался бы за счет средств ФКР, сформированного исходя из минимального размера взноса на капитальный ремонт в субъекте РФ.

Однако в Самарской области право дополнительного включения в состав работ по капитальному ремонту установки и восстановления имущества крыш, установленного по проекту, не реализовано [20].

Следовательно, работы по установке и (или) восстановлению дополнительных «проектных» элементов крыш в состав капитального ремонта не включены и из средств ФКР не финансируются.

Таким образом, ЖК РФ предусматривает и инициативу, и средства собственников для финансирования работ по капитальному ремонту общего имущества МКД сверх установленного состава работ за счет добровольного увеличения размер взноса на капитальный ремонт: «В случае принятия собственниками помещений в многоквартирном доме решения об установлении взноса на капитальный ремонт в размере, превышающем минимальный размер взноса на капитальный ремонт, часть фонда капитального ремонта, сформированная за счет данного превышения, по решению общего собрания собственников помещений в многоквартирном доме может использоваться на финансирование любых услуг и (или) работ по капитальному ремонту общего имущества в многоквартирном доме».

Однако практика показывает заведомую нежизнеспособность такого варианта дополнительного финансирования капитального ремонта крыш с декором и МАФ в силу целого ряда взаимосвязанных проблем, начиная от несогласия собственников увеличивать размер взносов и накапливать дополнительный фонд капитального ремонта и заканчивая далеко не первостепенной важностью таких работ в глазах собственников (в сравнении, например, с капитальным ремонтом инженерных систем и лифтов).

Таким образом, анализируя возможные варианты финансирования дополнительных работ по восстановлению декора и МАФ [21] при капитальном ремонте крыш МКД, авторы пришли к выводам, что:

- финансирование из ФКР невозможно, поскольку в Самарской области рассматриваемые работы не включены в установленный состав работ по ремонту плоских крыш, в предельную стоимость таких работ и в минимальный размер взноса на капитальный ремонт;
- предоставление финансовой поддержки из Фонда развития территорий исключено, поскольку не отвечает его целевым направлениям;
- привлечение дополнительного финансирования из средств собственников легитимно и теоретически возможно, но крайне маловероятно.

Формирование комплексного решения обозначенной в статье проблемы начато авторами с изучения вопроса финансирования неслучайно, поскольку ответ на него определяет целесообразность (или нецелесообразность) разработки дальнейшей системы

организационно-технических мероприятий по непосредственной реализации предложений.

В части организационно-административных процедур, сопровождающих капитальный ремонт крыш МКД с декором и МАФ, первостепенного внимания, по мнению авторов, требуют следующие взаимосвязанные вопросы:

1) установление историко-архитектурной ценности (художественной выразительности, эстетической ценности) дополнительного декора и МАФ крыш⁷ МКД;

2) установление необходимости (отсутствия необходимости) восстановления дополнительных элементов при проведении капитального ремонта крыш МКД.

Административно и нормативно процедура установления историко-архитектурной ценности конструктивно-декоративных элементов и МАФ зданий в настоящее время абсолютно не регулируется. В то же время вольно (например, управляющей компанией, товариществом собственников жилья и даже «частной» экспертизой) этот вопрос, очевидно, решаться не может. Здесь, по мнению авторов, уместно применить и адаптировать нормативное регулирование⁸ и практику проведения государственных историко-культурных экспертиз в отношении объектов недвижимости с целью выяснения, является ли тот или иной объект культурным наследием РФ, субъекта РФ или нет. Авторы полагают, что административный регламент Самарской области по установлению историко-архитектурной ценности конструкций и дополнительных элементов МКД должен быть несколько «мягче» порядка проведения историко-культурных экспертиз, но при этом однозначно определять саму процедуру и взаимодействие инициаторов (заявителей) и уполномоченных органов по разрешению данного вопроса.

Так, в качестве методической поддержки создания порядка определения историко-архитектурной ценности конструкций и дополнительных элементов МКД можно использовать исследования российских и зарубежных ученых. Например, в статье В.А.К. Алави и В.М. Молчанова «Оценка характеристик архитектурной выразительности фасадов экологических многоэтажных жилых комплексов» [21] достаточно объемно рассматриваются функциональные, эстетические и технические параметры, компоновка элементов фасада, определяющие архитектурную выразительность

⁷ В рамках настоящей статьи рассматриваются дополнительные элементы крыш. В общем случае подобная процедура актуальна для дополнительных декоративных и архитектурных элементов иных конструкций зданий и сооружений (например, фасадов).

⁸ Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/

и эстетическую ценность фасада и архитектурное качество здания в целом. Кроме того, ценной и научно-полезной в указанном исследовании является предложенная авторами система критериев и показателей, совокупной оценкой которых определяется художественная выразительность и архитектурная ценность фасада. При этом предложенная для фасада система оценки легко может быть адаптирована для других конструктивных элементов, создающих архитектурный облик здания, в нашем случае крыш. В случае признанной в установленном порядке историко-архитектурной ценности конструкций и дополнительных элементов МКД необходима разработка легитимных схем финансирования их восстановления без привлечения средств ФКР.

Для рассматриваемых в настоящей статье примеров авторами может быть дана следующая оценка историко-архитектурной ценности дополнительных элементов крыш МКД:

- пергола на крыше комплекса «Шанхай» обладает историко-архитектурной ценностью, поскольку является неотъемлемой частью истории здания, хорошо просматривается со стороны придомовой территории и с ближайших крупных улиц. Отсутствие устройства проектной пешеходной зоны на крыше сильно ухудшает внешний облик объекта;

- конструкция на крыше первого в Самаре 16-этажного дома, многократно использованного в городской застройке, не обладает историко-архитектурной ценностью, так как не просматривается со стороны тротуаров и не является акцентом при визуализации зданий со стороны р. Волга. Очевидно, что отсутствие данного украшения не изменит облик здания.

Следующим шагом, выполняемым в случае непризнания историко-архитектурной ценности дополнительного декора и МАФ крыш МКД, является прохождение процедуры установления необходимости (отсутствия необходимости) восстановления (или демонтажа) дополнительных элементов при проведении капитального ремонта крыш МКД. Здесь возвращаемся к примеру дополнительных элементов на крыше 16-этажного МКД на ул. Осипенко, 26 (и еще нескольких аналогичных типовых домов в г. Самара), где текущее состояние этих элементов создает угрозу безопасной эксплуатации зданий. В случае с МКД на ул. Осипенко, 26, согласно официальным сведениям сайта ФКР⁹, капитальный

ремонт крыши запланирован на 2041–2043 гг., т.е. через 20 лет. При этом угроза безопасности жителей от дополнительных элементов на крыше существует уже сегодня. Однако, даже если бы капитальный ремонт крыши этого дома производился в 2023 г., вопрос с финансированием восстановления или демонтажа этих дополнительных элементов все равно оставался бы открытым, поскольку, как мы выяснили выше, работы по установке и (или) восстановлению дополнительных «проектных» элементов крыш в состав капитального ремонта крыш не включены и из средств ФКР не финансируются. Для разрешения таких противоречий вновь следует указать на необходимость создания специального нормативного регулятора. По мнению авторов, такой документ должен предусматривать индивидуальный порядок решения проблемы для различных сценарных условий:

- при условии ближайшей перспективы капитального ремонта крыши по плану ФКР, например, включение работ по восстановлению или демонтажу дополнительных элементов крыш, оказывающих влияние на безопасность эксплуатации МКД, в состав капитального ремонта крыш с финансированием из ФКР;

- при условии отсутствия близкого капитального ремонта крыши, например, признание необходимости восстановления или демонтажа дополнительных элементов крыши вне ее планового капитального ремонта с финансированием из ФКР с обоснованием и соответствующим активированием причин.

В качестве нормативного аналога для регулирования можно предложить Порядок¹⁰, где согласно ст. 4: «Для установления необходимости (отсутствия необходимости) проведения капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах уполномоченным органом местного самоуправления в Самарской области создается комиссия, действующая на постоянной основе». Аналогичным способом — решением уполномоченной комиссии — возможно разрешение и вопросов восстановления или демонтажа дополнительных элементов конструкций, относящихся к общему имуществу МКД в процессе капитального ремонта или вне его.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Акцентируя проблематику исследования, следует констатировать, что процесс поддержания декоративных элементов и МАФ крыш (фасадов и других конструкций) зданий в удовлетворительном техническом состоянии не имеет сегодня нор-

⁹ О внесении изменений в постановление Правительства Самарской области от 29.11.2013 № 707 «Об утверждении региональной программы капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах, расположенных на территории Самарской области»: Постановление Правительства Самарской области от 03.05.2023 № 362. URL: <https://pravo.samregion.ru/postanovleniya-pravitelstva/postanovlenie-pravitelstva-samarskoj-oblasti-ot-03-05-2023-%E2%84%96362-o-vnesenii-izmenenij-v-postanovlenie-pravitelstva-samarskoj-oblasti-ot-29-11-2013-%E2%84%96707-ob-utverzhdenii-regi/>

¹⁰ Порядок установления необходимости (отсутствия необходимости) проведения капитального ремонта общего имущества в многоквартирном доме: утв. постановлением Правительства Самарской области от 16.02.2015 № 68. URL: <https://docs.cntd.ru/document/464016773>

мативно-правовой и организационно-экономической основы.

Подводя итоги прикладных исследований в настоящей работе, можно сделать следующие выводы:

- ключевым параметром для принятия решения о судьбе декоративных элементов и МАФ конструкций МКД является их историко-архитектурная (эстетическая, охранная) ценность, административный и содержательный порядок оценки которой необходимо разработать и закрепить на региональном уровне. При оценке историко-архитектурной ценности декора и МАФ следует устанавливать как меняется облик здания при отсутствии этого украшения (обзор здания с характерных точек города — придомовая территория, размещение в панораме города, тротуар прилегающей улицы). Приведенные в статье примеры демонстрируют очевидные различия в историко-архитектурной ценности декоративных элементов крыш МКД. Так, в силу того, что градостроительный комплекс «Шанхай» имеет интересную историю и хорошо просматривается на панораме города и с прилегающих улиц, оригинальное решение его крыши по оценкам авторов обладает историко-архитектурной ценностью и под-

лежит восстановлению до проектного состояния. Дополнительные металлические конструкции на крышах типовых 16-этажных МКД, напротив, архитектурный облик зданий (из-за их башенной формы) не меняют, и в целях обеспечения безопасной эксплуатации их целесообразно полностью или частично демонтировать в зависимости от технического состояния;

- регламентированного решения на уровне субъекта РФ требует вопрос порядка и источников финансирования ремонтных работ по восстановлению или демонтажу декоративных элементов и МАФ конструкций МКД.

Таким образом, упорядочивание нормативно-го и экономического обеспечения в области рассмотренных в настоящей статье проблем не позволит многим зданиям утратить индивидуальность во внешнем облике, а городской застройке — архитектурную выразительность. Вместе с тем создание таких нормативно-экономических инструментов в Самарской области позволит многим другим жилым зданиям безопасно эксплуатироваться, устраняя угрозу от некогда украшающих их и приходящих в негодность декоративных элементов и МАФ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорожук Н.Р. Проблемы архитектурного облика города // International scientific review. 2016. № 21. С. 94–95. EDN XETBQV

2. Семенов А.С., Захарова Т.В. Оценка физического износа крыш многоквартирных домов с учетом технологических особенностей ремонта // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 9. С. 1205–1217. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1205-1217 EDN ZSHEDH

3. Горбанева Е.П., Овчинникова Е.В., Севрюкова К.С., Мищенко А.В. Оценка эффективности внедрения энергоэффективных мероприятий при проведении капитального ремонта многоквартирных домов (на примере Воронежа) // Известия вузов. Строительство. 2020. № 10. С. 41–52. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-742-10-41-52 EDN YZJCOA

4. Липидус А.А., Экба С.И., Трегубова Е.Б., Кормухин С.А. Методика типизации многоквартирных домов, подлежащих капитальному ремонту общего имущества // Известия вузов. Строительство. 2023. № 2. С. 56–64. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-56-64 EDN YYOZGE

5. Grishin P.A., Gorovoy A.A., Kharlamov A.V., Butuzov A.N., Kuznetsov K.V., Arutyunyan A.A. et al. Evolution of engineering standards and estimation methods // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. Issue 3. Pp. 1819–1825.

6. Yang G., Wu J., Hu Q. Rapid detection of building cracks based on image processing technology with double square artificial marks // Advances in Structural

Engineering. 2019. Vol. 22. Issue 5. Pp. 1186–1193. DOI: 10.1177/1369433218810183

7. Mishchenko V.Ya., Gorbaneva E., Ovchinnikova E., Sevryukova K. Planning the optimal sequence for the inclusion of energy-saving measures in the process of overhauling the housing stock // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Pp. 79–91. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_8

8. Matreninskiy S., Mischenko V., Chertov V. Formation of classes of urban environment areas for their renovation // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 01014. DOI: 10.1051/mateconf/201819301014

9. Borkovskaya V.G., Passmore D. Behavioral engineering model to identify risks of losses in the construction industry // Smart Technologies and Innovations in Design for Control of Technological Processes and Objects: Economy and Production. 2020. Pp. 243–250. DOI: 10.1007/978-3-030-15577-3_24

10. Korol O., Dudina A. Engineering and technical support of territories for implementation of renovation projects of the housing stock // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06027. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706027

11. Lyapunova E., Belozeroва I., Drozdova I., Korol O. Safety in construction in the field of investment in urban infrastructure // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06034. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706034.

12. Шрейбер К.К., Король Е.А. Теоретические аспекты формирования нормативно-методической

базы капитального ремонта общего имущества многоквартирных домов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 11. С. 1473–1481. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1473-1481

13. *Fatullaev R.S.* Organizational and technological methods for unscheduled repair works // Components of Scientific and Technological Progress. 2017. Vol. 3. Issue 33. Pp. 17–22. EDN XTGBTF

14. *Fatullaev R.S.* Modeling and assessment of a multi-apartment residential house with a planned overhaul // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 110. P. 02157. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002157

15. *Шрейбер К.К.* Рекомендации по совершенствованию организационно-технологической подготовки капитального ремонта многоквартирных домов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 11. С. 50–55. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.11.50-55 EDN MOMOXI

16. *Овсянникова Т.Ю.* Оценка эксплуатационного ресурса жилых зданий в условиях финансовой ограниченности региональных программ капитального ремонта // Недвижимость: экономика, управление. 2017. № 2. С. 30–36. EDN ZXLZIR

17. *Yildiz S., Kivrak S., Arslan G.* Contribution of built environment design elements to the sustainability of

urban renewal projects: model proposal // Journal of Urban Planning and Development. 2019. Vol. 145. Issue 1. Pp. 3–7. DOI: 10.1061/(asce)up.1943-5444.0000493

18. *Алавси В.А.К., Молчанов В.М.* Оценка характеристик архитектурной выразительности фасадов экологических многоэтажных жилых комплексов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 55–71. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-55-71 EDN APQOVD

19. *Matreninskiy S., Mischenko V., Chertov V.* Formation of classes of urban environment areas for their renovation // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 01014. DOI: 10.1051/matecconf/201819301014

20. *Ильина М.В., Мамаева О.А., Коновалова М.А., Спирина Е.С., Бочаров А.Ю.* Методика определения состава работ по капитальному ремонту многоквартирных жилых домов : методические рекомендации. Самара : Центр по ценообразованию в строительстве, 2013. 186 с.

21. *Гордеева Т.Е., Еранцев Д.В.* О факторах, влияющих на восстановление балконов жилых домов разного периода постройки // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12. № 1 (46). С. 138–142. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.01.18 EDN RVKLWM

Поступила в редакцию 18 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Татьяна Евгеньевна Гордеева** — кандидат технических наук, доцент, декан строительного факультета; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; SPIN-код: 2567-3831, Scopus: 57194452993, ResearcherID: O-1325-2016, ORCID: 0000-0002-0193-7116; ftgs-sgasu@mail.ru;

Ольга Анатольевна Мамаева — кандидат экономических наук, доцент кафедры стоимостного инжиниринга и технической экспертизы зданий и сооружений; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 00082258, Scopus: 57201183999, ResearcherID: O-1330-2016, ORCID: 0000-0002-5868-7226; kafedra_cen@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Doroshchuk N.R. Problems of the architectural appearance of the city. *International Scientific Review*. 2016; 21:94-95. EDN XETBQV

2. *Semenov A.S., Zakhrova T.V.* Assessment of physical wear and tear of roofs of apartment buildings taking into account the technological features of repair. *Bulletin of MGSU*. 2019; 14(9):1205-1217. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1205-1217 EDN ZSHEDH

3. *Gorbaneva E.P., Ovchinnikova E.V., Sevryukova K.S., Mishchenko A.V.* Estimation of the efficiency of implementation of energy efficient measures during the capital repairs of apartment buildings (on the example of Voronezh). *News of Universities. Construction*.

2020; 10:41-52. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-742-10-41-52 EDN YZJCOA

4. *Lapidus A.A., Ekba S.I., Tregubova E.B., Kormukhin S.A.* Method of typification of multi-apartment residential houses subject to overhaul of common property. *News of Universities. Construction*. 2023; 2:56-64. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-56-64 EDN YYOZGE

5. *Grishin P.A., Gorovoy A.A., Kharlamov A.V., Butuzov A.N., Kuznetsov K.V., Arutyunyan A.A. et al.* Evolution of engineering standards and estimation methods. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019; 10(3):1819-1825.

6. Yang G., Wu J., Hu Q. Rapid detection of building cracks based on image processing technology with double square artificial marks. *Advances in Structural Engineering*. 2019; 22(5):1186-1193. DOI: 10.1177/1369433218810183
7. Mishchenko V.Ya., Gorbaneva E., Ovchinnikova E., Sevryukova K. Planning the optimal sequence for the inclusion of energy-saving measures in the process of overhauling the housing stock. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 79-91. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_8
8. Matreninskiy S., Mischenko V., Chertov V. Formation of classes of urban environment areas for their renovation. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:01014. DOI: 10.1051/mateconf/201819301014
9. Borkovskaya V.G., Passmore D. Behavioral engineering model to identify risks of losses in the construction industry. *Smart Technologies and Innovations in Design for Control of Technological Processes and Objects: Economy and Production*. 2020; 243-250. DOI: 10.1007/978-3-030-15577-3_24
10. Korol O., Dudina A. Engineering and technical support of territories for implementation of renovation projects of the housing stock. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06027. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706027
11. Lyapunsova E., Belozeroва I., Drozdova I., Korol O. Safety in construction in the field of investment in urban infrastructure. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06034. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706034
12. Schreiber K.K., Korol E.A. Theoretical aspects of the formation of a normative and methodological basis for capital repairs of common property of apartment buildings. *Bulletin of MGSU*. 2019; 14(11):1473-1481. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1473-1481
13. Fatullaev R.S. Organizational and technological methods for unscheduled repair works. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2017; 3(33):17-22. EDN XTGBTF
14. Fatullaev R.S. Modeling and assessment of a multi-apartment residential house with a planned overhaul. *E3S Web of Conferences*. 2019; 110:02157. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002157
15. Schreiber K.K. Recommendations for improvement of organizational and technological preparation of overhaul of apartment buildings. *Industrial and Civil Construction*. 2019; 11:50-55. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.11.50-55 EDN MOMOXI
16. Ovsyannikova T.Yu. Estimating the operational life of residential buildings under financial limitations of regional overhaul programs. *Real Estate: Economics, Management*. 2017; 2:30-36. EDN ZXLZIR
17. Yildiz S., Kivrak S., Arslan G. Contribution of built environment design elements to the sustainability of urban renewal projects: model proposal. *Journal of Urban Planning and Development*. 2019; 145(1):3-7. DOI: 10.1061/(asce)up.1943-5444.0000493
18. Alavsi V.A. K., Molchanov V.M. Facade architecture of eco-friendly residential clusters. *Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22(2):55-71. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-55-71 EDN APQOVD
19. Matreninskiy S., Mischenko V., Chertov V. Formation of classes of urban environment areas for their renovation. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:01014. DOI: 10.1051/mateconf/201819301014
20. Ilyina M.V., Mamaeva O.A., Konovalova M.A., Spirina E.S., Bocharov A.Yu. *Methodology for determining the scope of work for the overhaul of multi-apartment residential buildings : guidelines*. Samara, Center for Pricing in Construction LLC, 2013; 186.
21. Gordeeva T.E., Erantsev D.V. On the factors affecting the restoration of balconies of residential buildings of different periods of construction. *Urban Planning and Architecture*. 2022; 12(1):138-142. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.01.18 EDN RVKLWM

Received September 18, 2023.

Adopted in revised form on February 6, 2024.

Approved for publication on February 6, 2024.

B I O N O T E S : **Tatiana E. Gordeeva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Construction and Technology; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 2567-3831, Scopus: 57194452993, ResearcherID: O-1325-2016, ORCID: 0000-0002-0193-7116; ftgs-sgasu@mail.ru;

Olga A. Mamaeva — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Cost Engineering and Technical Expertise of Buildings and Structures; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 00082258, Scopus: 57201183999, ResearcherID: O-1330-2016, ORCID: 0000-0002-5868-7226; kafedra_cen@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.

Использование инструмента бережливого производства в управлении поставками материалов в течение жизненного цикла строительного проекта

Людмила Анатольевна Опарина, Евгений Александрович Барзыгин,
Ярослава Александровна Гриднева, Наталья Сергеевна Касьяненко

Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); г. Иваново, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При выборе контрактной модели Engineering, Procurement, Construction (EPC) жизненным циклом (ЖЦ) строительных проектов управляет специализированная организация-контрактор. Данная форма управления строительными проектами является относительно новой для российских застройщиков, ее успешная реализация зависит от различных организационно-технических решений, в частности управления материально-техническим снабжением. Проблематика исследования связана с существующими рисками организации поставок материально-технических ресурсов при реализации строительных проектов по модели EPC, которые оказывают негативное влияние на важнейшие показатели эффективности строительства, такие как сроки и стоимость. Описаны стратегии предотвращения рисков событий, наступающих при планировании поставок материально-технических ресурсов в течение ЖЦ строительных проектов (риски изменения цены, риски нарушения контрактных обязательств, риски изменения качества поставки, репутационные риски и риски существенного изменения спроса). Решены задачи по митигации рисков с помощью применения инструментов бережливого производства.

Материалы и методы. Использованы методология и стандарты управления проектами применительно к процессам материально-технического обеспечения строительства, а также методы календарно-сетевое планирования, методы декомпозиции содержания проекта, методы контрактной стратегии реализации строительных проектов и элементы методологии пакетно-узловой метода строительства.

Результаты. Описаны результаты исследования и даны рекомендации по практическому использованию инструмента гибкой методологии управления проектами, известному в международной практике как Just In Time, что в переводе на русский язык означает «Точно, вовремя».

Выводы. Представлено обоснование использования предлагаемого инструмента планирования как мероприятия для снижения рисков, связанных с поставками материалов, и повышения эффективности управления ЖЦ строительных проектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жизненный цикл строительного проекта, многоуровневое планирование, календарно-сетевое планирование, пакетно-узловой метод строительства, риски, бережливое производство, управление проектами, строительство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Опарина Л.А., Барзыгин Е.А., Гриднева Я.А., Касьяненко Н.С. Использование инструмента бережливого производства в управлении поставками материалов в течение жизненного цикла строительного проекта // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 826–835. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.826-835

Автор, ответственный за переписку: Людмила Анатольевна Опарина, L.A. Oparina@gmail.com.

Using lean manufacturing tools in materials supply management during the life cycle of a construction project

Lyudmila A. Oparina, Evgenii A. Barzygin, Yaroslava A. Gridneva,
Natalya S. Kasyanenko

Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU); Ivanovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When choosing the Engineering, Procurement, Construction (EPC) contract model, the life cycle of construction projects is managed by a specialized contractor organization. This form of construction project management is relatively new for Russian developers, and its successful implementation depends on various organizational and technical solutions, in particular, logistics management. The research problem is related to the existing risks of organizing the supply of material and technical resources during the implementation of construction projects using the EPC model, which have a negative impact on the most important indicators of construction efficiency, such as timing and cost. The paper describes strategies for preventing risk events that occur when planning the supply of material and technical resources during the life cycle

of construction projects (risks of price changes, risks of violation of contractual obligations, risks of changes in the quality of delivery, reputational risks and risks of significant changes in demand). The problems of risk mitigation using lean manufacturing tools were solved.

Materials and methods. The methodology and standards of project management as applied to the processes of material and technical support of construction, as well as methods of calendar-network planning, methods of project content decomposition, methods of contract strategy of construction projects implementation and elements of the methodology of package-node method of construction were used.

Results. The results of the research are described and recommendations are given for the practical use of the flexible project management tool known in international practice as Just In Time.

Conclusions. A justification for the use of the proposed planning tool as an activity to reduce risks associated with the supply of materials and improve the efficiency of life cycle management of construction projects is presented.

KEYWORDS: construction project life cycle, multi-level planning, calendar-network planning, package-node construction method, risks, lean manufacturing, project management, construction

FOR CITATION: Oparina L.A., Barzygin E.A., Gridneva Ya.A., Kasyanenko N.S. Using lean manufacturing tools in materials supply management during the life cycle of a construction project. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):826-835. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.826-835 (rus.).

Corresponding author: Lyudmila A. Oparina, L.A. Oparina@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Контрактная модель строительства объекта модели Engineering, Procurement, Construction (EPC) предполагает управление жизненным циклом инвестиционно-строительного проекта специализированной организацией. Такие проекты объединяют в своем содержании несколько типов проектов (проектирование, поставка оборудования и материалов, строительство) [1]. Выполнение EPC-контрактом своих обязательств по точному соблюдению сроков и стоимости проекта особенно важно, так как он несет на себе все риски его реализации. Риск — это событие или состояние, обусловленное неопределенностью, результат которого может привести как к положительному, так и к отрицательному эффекту в проекте [2]. В данном исследовании поднимается проблема митигации рисков поставок материально технических ресурсов (МТР). По времени хранения и использования строительных материалы могут быть разделены на МТР краткосрочного или ограниченного времени использования и МТР долгосрочного времени хранения и использования. Ограниченность времени хранения и использования строительных материалов накладывает ограничения на условия поставок и хранения МТР, в связи с чем возникают риски невыполнения этих условий, что может негативно отразиться на качестве, сроках и стоимости строительства [3].

Одной из основных категорий рисков строительных проектов являются риски из категории нарушения контрактных обязательств поставщиками, также в методологиях управления проектами разработаны стратегии реагирования на риски из указанных категорий¹ [4] (табл.).

Выбирая стратегию реагирования на риски из названной в таблице Категории 2, в практике реа-

лизации проектов возможно использование только некоторых стратегий. В данном исследовании не рассматриваются стратегии реагирования на риски А и D по причине отсутствия необходимых информационных связей с методологией календарно-сетевого планирования (КСП), т.е. в связи с невозможностью планирования.

Планирование мероприятий по реагированию на риски в случае выбора Стратегии В практически носит организационно-юридический характер и влияет на процессы поставок лишь косвенно в связи с тем, что в случае возникновения рисков события мероприятия, предусмотренные данной стратегией, будут оказывать понижающее или смягчающее воздействие, но при этом никак не могут повлиять на сам факт возникновения или предотвращения непосредственно самого рисков события.

Таким образом, для предотвращения рисков события из Категории 2 был сделан вывод о возможности использования Стратегии реагирования на риски С, что дает возможность применения организационно-управленческих методов, в частности планирование с использованием двух подходов, применение инструмента Just In Time и применение методологии КСП.

Первый подход предполагает использование технологии «бережливого производства», известной как Lean-технология или Toyota Production System (TPS), разработанной корпорацией Toyota, для предотвращения или полного устранения рисков, связанных с поставками МТР и называемых в данной технологии «потерями». К 1961 г. был разработан и внедрен инструмент Just In Time, который предполагает осуществление поставок МТР непосредственно на производственный конвейер, что полностью снимает риски затоваривания складских помещений или возникновения риска снижения качества МТР в случае наличия ограничений во времени хранения или использования МТР, как в случае с композитными материалами в строи-

¹ The standard for risk management in portfolios, programs, and projects // Project Management Institute. Eng. Newtown Square, PA. USA. 2019

Категории рисков материально-технического обеспечения и стратегии реагирования
Procurement risk categories and response strategies

Наименование категории риска Risk category name	Стратегии реагирования Response strategies			
	A. Уклонение Evasion	B. Передача и разделение Transfer and division	C. Снижение Decline	D. Принятие Adoption
Риски существенного изменения цены МТР Risks of significant changes in the price of material and technical resources	Риски избегаются путем изменения части проекта Risks are avoided by changing part of the project	Страхование. Гарантии выполнения контракта. Поручительства и гарантийные обязательства. Передача ответственности за риски третьей стороне Insurance. Contract performance guarantees. Guarantees and guarantees. Transferring responsibility for risks to a third party	Понижение вероятности реализации риска. Понижение последствий негативного рискованного события до приемлемых пределов Reducing the probability of risk realization. Reducing the consequences of a negative risk event to acceptable limits	Принятие решения не реагировать на возможные риски Deciding not to react to possible risks
Риски нарушения контрактных обязательств поставки МТР (сроки) Risks of violation of contractual obligations for the supply of material and technical resources (deadlines)				
Риски изменения качества поставки МТР Risks of changes in the quality of supply of material and technical resources				
Репутационные риски поставок МТР Reputational risks of supplies of material and technical resources				
Риски существенного изменения спроса на МТР Risks of significant changes in demand for material and technical resources				

тельстве [5]. Следует отметить тот факт, что в 1930 г. в СССР был разработан похожий метод под названием «точно в срок», который не получил широкого применения². Причиной успеха внедрения инструмента Just In Time в корпорации Toyota является большой объем затраченных усилий на подготовку персонала как в самой Toyota, так и персонала многочисленных компаний-поставщиков.

Второй подход предполагает использование общепризнанного практического инструмента управления проектами, которым является методология в формате диаграммы Ганта, в нем используется сетевая модель, интегрированная в производственный календарь, чаще всего называемая календарно-сетевым графиком (КСГ)³ [6–8].

Для решения проблем предотвращения рисков поставок МТР была сформирована цель исследования: разработать практические рекомендации по использованию инструмента бережливого произ-

водства Just In Time для формирования календарно-сетевого графика поставок материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривая инструменты методологии КСП, были выделены четыре задачи как основные направления исследования, которые одновременно послужили основными методами исследования:

1. Рассмотреть процессы планирования поставок МТР с точки зрения инструментов и методов, используемых при выборе контрактной модели ЕРС.
2. Определить оптимальную структуру Work Breakdown Structure (WBS) — инструмента декомпозиции содержания проекта, используемого в российской практике под названием Иерархическая структура работ (ИСР)⁴ [9–11].
3. Выяснить, на каком из уровней многоуровневой модели планирования проектов возможно использование сочетание инструментов Just In Time и КСГ.

⁴ ГОСТ Р ИСО/ISO 21500–2014. Руководство по проектному менеджменту. Национальный стандарт РФ. М. : Стандартинформ, 2015.

² Пятилетний план народно-хозяйственного строительства СССР. 3-е изд. Госплан СССР. М. : Плановое хозяйство, 1930.
³ Practice standard for scheduling // Project Management Institute Eng. Newtown Square, PA, USA. 2019.

В исследовании использовалась многоуровневая модель планирования, состоящая из двух уровней:

- комплексный КСГ 2-го уровня, с функциональной декомпозицией WBS, построенной в соответствии с контрактной стратегией EPC;
- три детальных КСГ 3-го уровня, с функциональной декомпозицией WBS, построенных в соответствии с контрактной стратегией EPC и принципом Advanced Work Packaging (AWP) [12, 13].

4. Оценить возможность использования инструмента AWP, известного в России как Пакетно-узловой метод (ПУМ) организации строительства, который предполагает декомпозицию содержания проекта на пакеты работ по принадлежности к функциональным областям, одной из которой является материально-техническое обеспечение (МТО) [14–16].

Исследование проводилось с использованием метода критического пути, сетевых и линейных диаграмм, интегрированной системы управления проектами (ИСУП) Oracle Primavera P6 Professional с обработкой данных посредством MS Office.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве результатов решения задач 1, 2, 3 была создана WBS Проекта EPC-contract Level-2 в логике контрактной модели EPC, которая является комплексным графиком и содержит в себе все необходимые результаты контракта EPC в укрупненном виде в табличном варианте и в виде иерархической диаграммы (рис. 1, 2).

При построении КСГ 2-го уровня было выявлено, что комплексный график, основываясь на де-

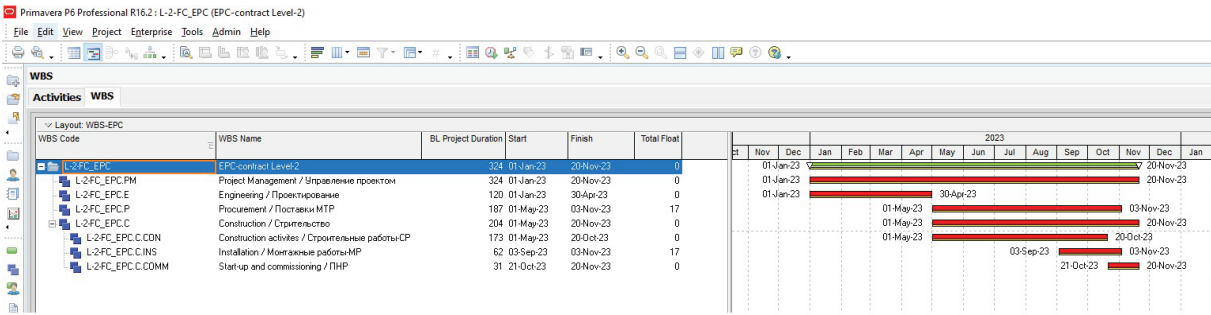


Рис. 1. WBS Проекта EPC-contract Level-2 — табличный вариант

Fig. 1. WBS Project EPC-contract Level-2 — tabular version

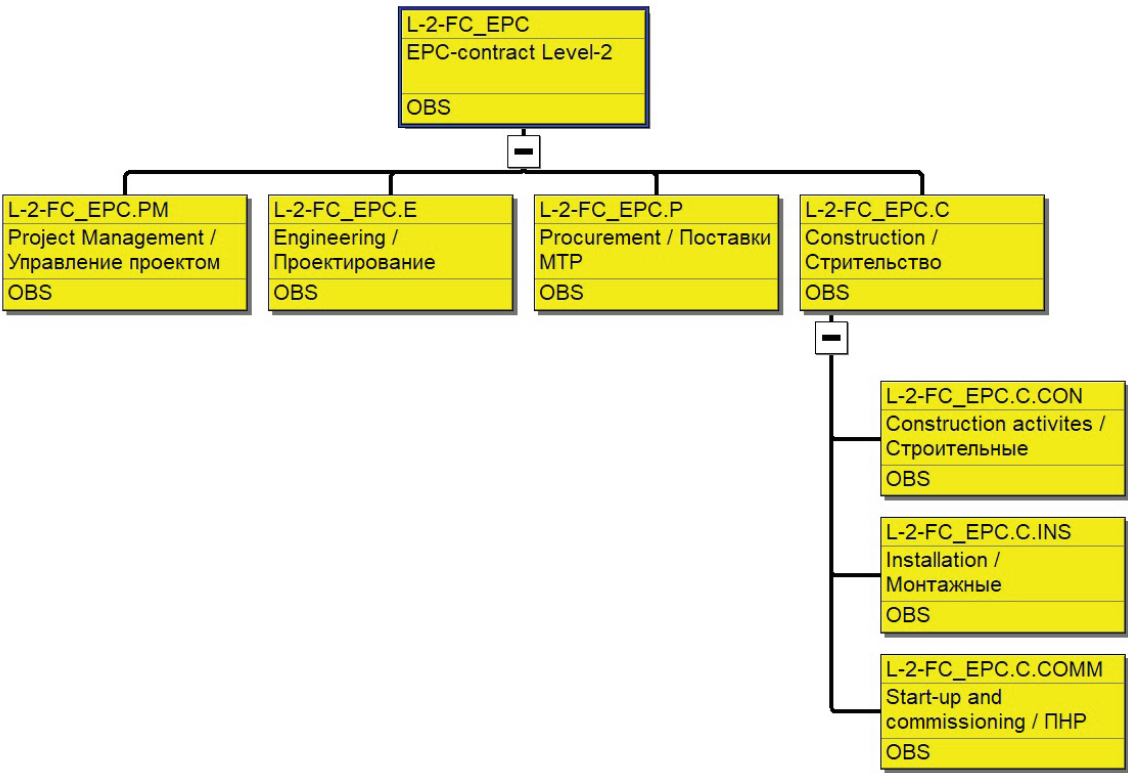


Рис. 2. WBS Проекта EPC-contract Level-2 — иерархическая диаграмма

Fig. 2. WBS Project EPC-contract Level-2 — hierarchical diagram

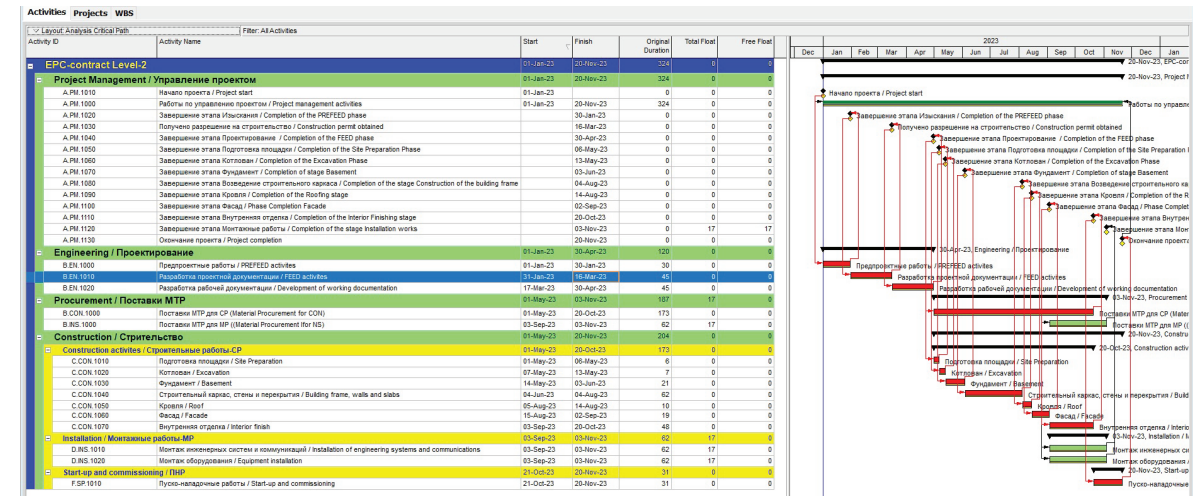


Рис. 3. Комплексный КСГ Проекта EPC-contract Level-2

Fig. 3. Integrated schedule of Project EPC-contract Level-2

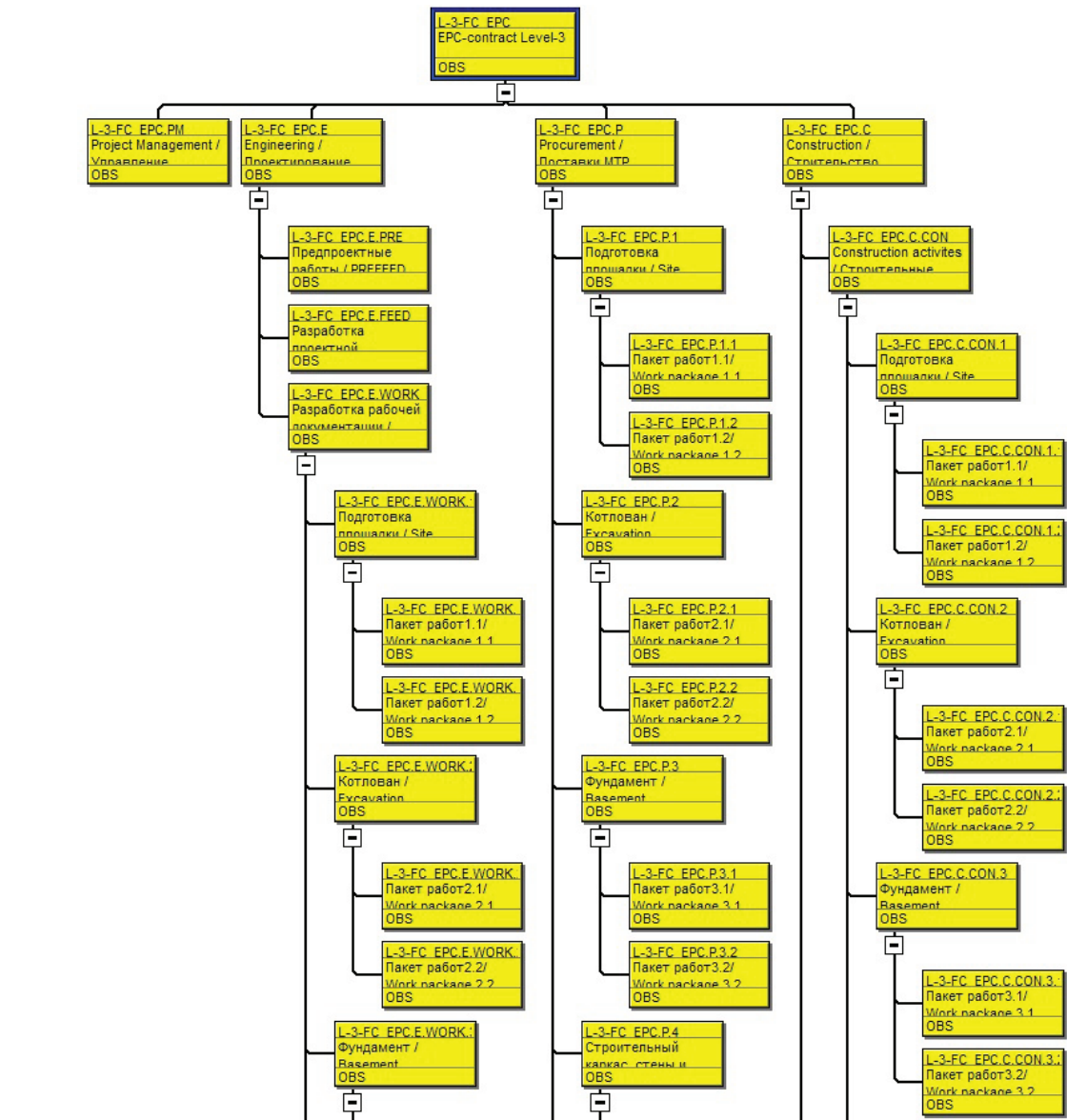


Рис. 4. Фрагмент WBS Проекта EPC-contract Level-3 — иерархическая диаграмма

Fig. 4. Fragment of WBS Project EPC-contract Level-3 — hierarchical diagram

композицию по функциональным областям ЕРС, не может иметь необходимую интеграцию с инструментом Just In Time, поскольку плановая информация о поставках в нем представлена в укрупненном виде и требует более глубокой детализации, что наглядно видно в комплексном КСГ Проекта ЕРС-contract Level-2, построенного в логике контрактной модели ЕРС (рис. 3).

При анализе КСГ (рис. 1) методом критического пути необходимо обратить внимание на значение показателей Общего и Свободного резервов для работ графика. Все работы графика, за исключением работ узла WBS Монтажные работы и связанных с ними поставок оборудования, принадлежат критическому пути, что означает отсутствие резервов времени выполнения большинства работ проекта и наличие высокой степени неопределенности, означающей высокое влияние рисков на данные работы, в том числе на работы узла WBS Поставки МТР.

Следующим примером значительного влияния рисков на работы узла WBS Поставки МТР является зависимость их длительности от плановой и текущей длительности работ узла WBS Строительство, в связи с чем планирование и осуществление поставок МТР вызывает определенные сложности. В практике строительства наиболее распространенным способом воздействия на данный вид неопределенности является осуществления комплексных поставок на приобъектные склады МТО с дальнейшим хранением до даты их использования, что, в свою очередь, вызывает возникновение дополнительных рисков удорожания строительства при возникнове-

нии неликвидных складских остатков, выполнении дополнительных погрузо-разгрузочных работ, использование дополнительных транспортных услуг и других внеплановых логистических работ.

Для создания Детального КСГ 3-го уровня была детализирована и трансформирована структура WBS Проекта ЕРС-contract Level-2 с добавлением повторяющихся узлов WBS «Вид работ» для функциональных узлов WBS: узел «Разработка рабочей документации», узел «Поставки МТР», узел «Строительство» с вложенным узлом «Строительные работы». Далее для каждого вида работ были добавлены по два «пакета работ» с одинаковой нумерацией (рис. 4, 5).

На рис. 4 наглядно представлен принцип пакетной декомпозиции структуры WBS проекта согласно ПУМ организации строительства для групп пакетов работ: «Разработка рабочей документации», «Поставка МТР» и «Строительные работы», сохраняя одинаковое количество пакетов в каждой группе.

Работы каждого пакета имеют последовательные технологические зависимости типа «Финиш к старту» в логике «проектирование» → «поставка» → «строительство». Следует отметить, что в данном исследовании подразумевается, что этап «Разработка проектной документации» планируется укрупненно, а затем, после прохождения экспертизы и получения разрешения на строительство, на следующем этапе проектирования происходит детализация проектной документации — «Раз**работка рабочей документации» в форме детализированных пакетов, в состав которых входит документ «Спецификация

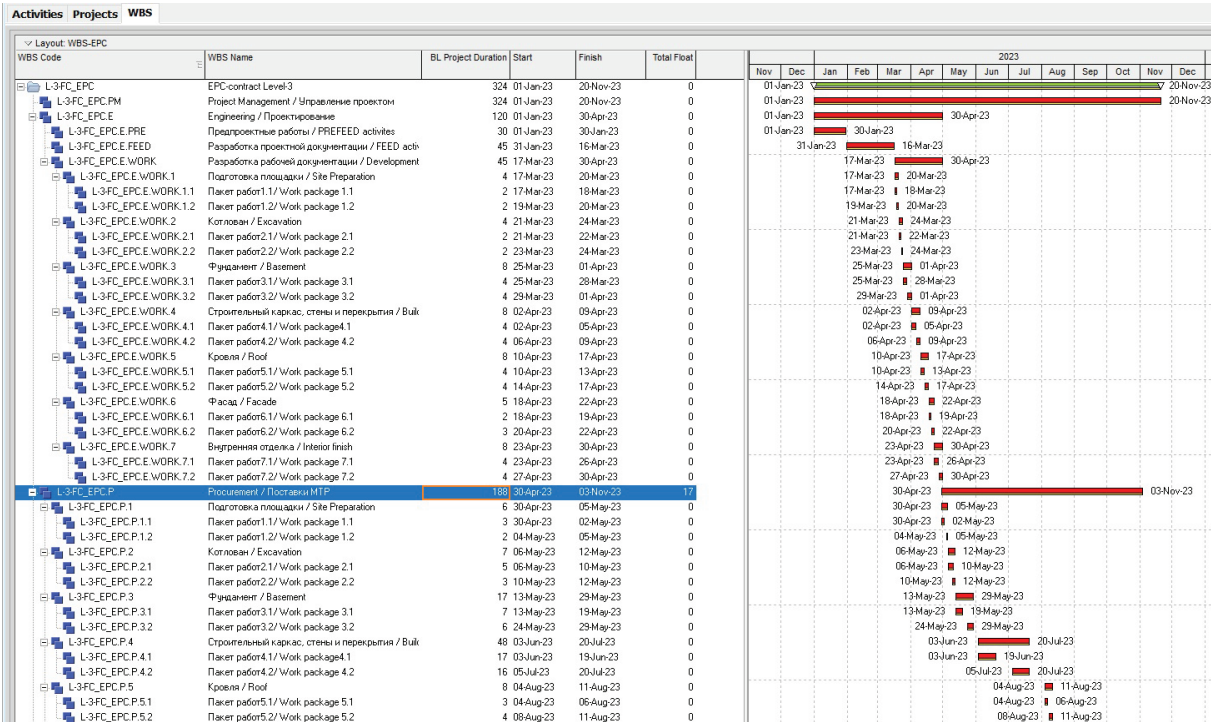


Рис. 5. Фрагмент WBS Проекта EPC-contract Level-3 — табличный вариант

Fig. 5. Fragment of WBS Project EPC-contract Level-3 — tabular version

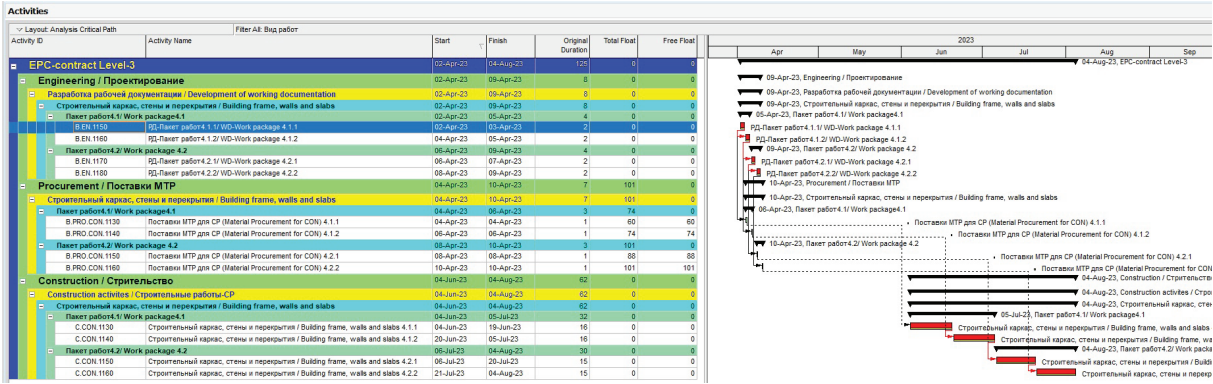


Рис. 6. Фрагмент КСГ Проекта EPC-contract Level-3 — пакет работ Строительный каркас

Fig. 6. Fragment of schedule Project EPC-contract Level-3 — work package Building frame, walls and slabs

на строительные материалы» для каждого детализированного пакета строительных работ⁵. При анализе значений Полного резерва пакетов работ в структуре WBS после использования логики пакетирования ПУМ было определено, что работы по поставке МТР перестали принадлежать критическому пути, так как значение их Полного резерва значительно увеличилось и стало выше нуля. Данный вывод говорит о снижении уровня неопределенности за счет использования прогрессивного метода планирования пакетов работ проекта.

Теперь рассмотрим логику построения работ КСГ 3-го уровня для одного из пакета работ (рис. 6). На рис. 6 из диаграммы Ганта видно, что работы пакетов по поставке МТР начинаются сразу после завершения работ пакетов по разработке рабочей документации для пакетов работ по возведению строительного каркаса. При этом, до начала строительных работ, работы по поставке МТР имеют значительный Свободный резерв в диапазоне от 60 до 101 дня.

⁵ О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 № 87 (ред. от 15.09.2023).

Следующим шагом исследования было изучение аспектов практического использования инструмента Just In Time и устранения значений Свободного резерва для работ по поставке МТР. Было определено, что для применения инструмента Just In Time в существующем КСГ необходимо установить ограничения типа «как можно позже» на работы по поставке МТР (рис. 7).

В рассматриваемом фрагменте КСГ после установки ограничений работы пакетов по поставке МТР сместились к работам пакетов Строительный каркас на величину Свободного резерва и стали принадлежать критическому пути, так как значение Полного и Свободного резервов стало равно нулю. Подобное явление наблюдалось для всех работ по поставке МТР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концепция бережливого производства представляет собой подход к управлению организацией/отдельным проектом, направленный на повышение качества работы за счет сокращения потерь при реализации того или иного процесса [19]. Исследование вопросов и решение научно-практических задач

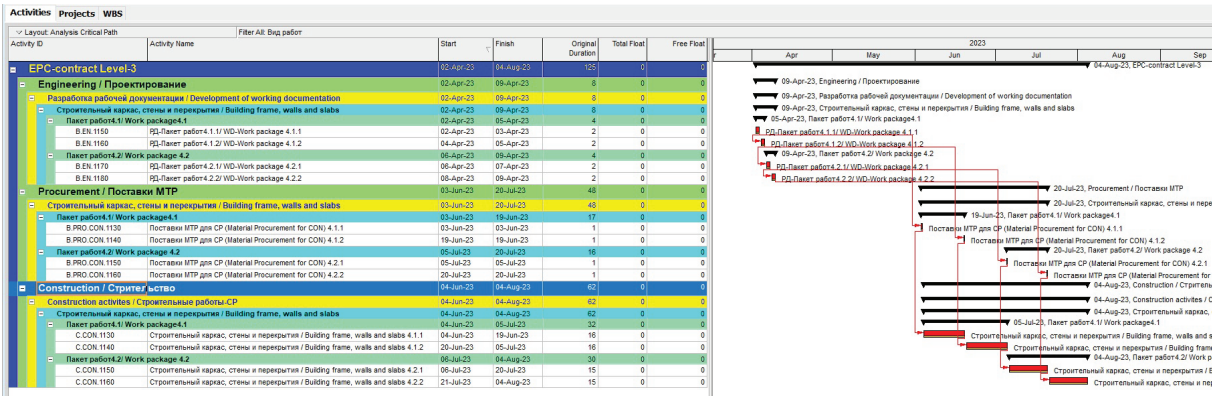


Рис. 7. Фрагмент КСГ Проекта EPC-contract Level-3 — пакет работ строительный каркас с использованием инструмента Just In Time

Fig. 7. Fragment of schedule Project EPC-contract Level-3 — work package Building frame, walls and slabs

применимости инструмента бережливого производства Just In Time для формирования календарно-сетевого графика поставок строительных материалов было доказано практическим путем. Однако необходимо понимать, что техническое «обнуление» свободного и полного резервов за счет использования ограничений для работ КСГ не означает фактическое отсутствие этих резервов для работ по поставке МТР и их предшественников — работ по разработке рабочей документации. Скрытые резервы времени возможно использовать для планирования работ по организации торгов или экспертизе рабочей документации, а также увеличения длительности и эффективного планирования ресурсов для уже спланированных работ.

Для планирования поставок некоторых видов строительных материалов, таких как бетон, необходимо уделять большее внимание детализации пакетов работ и при необходимости устанавливать положительные задержки времени для работ по поставке МТР для увеличения степени точности планирования сроков поставок МТР.

В свою очередь, следует учитывать тот факт, что высокая степень точности планирования подвержена рискам, связанным с изменениями текущего выполнения строительных работ, что связано с необходимостью регулярной актуализации КСГ

и внесения изменений в контрактные обязательства участников проекта.

При актуализации фактического выполнения работ проекта необходимо понимать зависимость и направление изменений текущего состояния КСГ, поскольку при определении причин отклонений от базового плана, прежде всего, следует учитывать зависимости между технологически связанными между собой строительными работами, а не только зависимости от поставок МТР. Несмотря на тот факт, что работы по поставке МТР являются «работами-предшественниками» для строительных работ, не каждая фактическая задержка поставок МТР является причиной задержки выполнения строительных работ при использовании инструмента Just In Time, поскольку планирование работ МТР по отношению к выполнению строительных работ является вторичным.

Учитывая неоднократно подтвержденную эффективность использования технологии бережливого производства в международной и отечественной практиках промышленного производства, использование инструмента Just In Time в календарно-сетевом планировании при осуществлении поставок МТР позволит повысить эффективность реализации инвестиционно-строительных проектов, а в дальнейшем интегрироваться с современными технологиями информационного моделирования [20, 21].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудреватых В.В. Особенности управления требованиями в сфере управления проектами в инжиниринговой компании полного цикла // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1175–1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1175-1190
2. Лapidус А.А., Чaпидзе О.Д. Совершенство-вание анализа факторов технических рисков с использованием комплексной модели FLDS на примере строительства многоэтажных жилых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 12. С. 1608–1619. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1608-1619
3. Wang Y., Chen X. Risk management for construction material supply chain : a review // Journal of Construction Engineering and Management Eng. 2020.
4. Щербанин Ю.А., Шиков В.О. Рисковые события и их характеристики // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2019. Т. 17. С. 54–74. DOI: 10.29003/m811.sp_ief_ras2019/54-74
5. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства. М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2008. С. 121–125.
6. Hammad Al-Nasseri, Kristian Widén, Radhlinah Aulin. A taxonomy of planning and scheduling methods to support their more efficient use in construction

- project management // Journal of Engineering Design and Technology. 2016. Vol. 14. Issue 1. Pp. 580–601. DOI: 10.1108/JEDT-11-2013-0078
7. Поляков А.Н. Американские технократы. Генри Лоуренс Гантт // Management: журнал. 2021. № 1 (57). С. 58–63.
8. Morris P.W.G., Pinto J.H. The Gantt chart: A century of evolution // Project Management Journal Eng. 2019.
9. Practice Standard for Work Breakdown Structure. 3rd ed. Project Management Institute Eng. Newtown Square, PA. USA. 2019.
10. Zein M.A., Al-Salman A.M. A review of hierarchical structures in project management // International Journal of Project Management Eng. 2021.
11. Supriyono, Nur Chasanah. Software development project management based on work breakdown structure and ODOO ERP // Jurnal Teknik Informatika (JUTIF). 2023. Vol. 4. Issue 4. Pp. 893–898. DOI: 10.52436/1.jutif.2023.4.4.1077.
12. Srivastava R.K., Jain S.K. A multi-level approach to project planning and control // International Journal of Project Management Eng. 2020.
13. Ali J.H., Al-Suliman S.A. A comparative study of network scheduling techniques for construction projects // Journal of Construction Engineering and Management, 2021.

14. Ryan G. Even more schedule for sale. Advanced work packaging for construction projects. AuthorHouse Eng. Bloomington, Indiana USA. 2017. P. 135.

15. Al-Hussein M.R., Odeh M.T. Advanced work packaging: An innovative approach to construction planning and execution // Journal of Construction Engineering and Management Eng. 2017.

16. Bradley Copeland. Digital advanced work packaging — a case study in construction-led delivery // The APPEA Journal. 2023. Vol. 63. Issue 2. Pp. S169-S172. DOI: 10.1071/AJ22046.

17. Кулаков К.Ю., Орлов А.К., Канхва В.С. Цепочки создания ценности в строительстве на основе концепции бережливого производства в условиях

цифровой трансформации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1647–1660. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1647-1660

18. Zhang X., Azhar S., Nadeem A., Khal-fan M. Using Building Information Modelling to achieve Lean principles by improving efficiency of work teams // International Journal of Construction Management. 2018. Vol. 18. Issue 4. Pp. 293–300. DOI: 10.1080/15623599.2017.1382083

19. Porter M.E., Heppelmann J.E. How smart, connected products are transforming competition // Harvard Business Review. November 2014. URL: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>

Поступила в редакцию 24 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 января 2024 г.

Одобрена для публикации 20 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Людмила Анатольевна Опарина — доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой организации производства и городского хозяйства, советник РААСН; Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; РИНЦ ID: 558560, Scopus: 57128068100, ResearcherID: V-5060-2017, ORCID: 0000-0001-5534-727X; L.A. Oparina@gmail.com;

Евгений Александрович Барзыгин — доцент кафедры организации производства и городского хозяйства; Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; barzygin@mail.ru;

Ярослава Александровна Гриднева — доцент кафедры организации производства и городского хозяйства; Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 8504-1658, ORCID: 0000-0003-1570-7087; yaroslava.l.a1@gmail.com;

Наталья Сергеевна Касьяненко — кандидат технических наук, доцент кафедры естественных наук и технологической безопасности; Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; РИНЦ ID: 558560, Scopus: 58567398000, ORCID: 0000-0002-4046-9300; kasiyanenko@gmail.com.

Вклад авторов:

Опарина Л.А. — научное руководство, концепция исследования.

Барзыгин Е.А. — проведение расчетов, участие в выборе методологии и методов исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Гриднева Я.А. — формирование ключевых слов и введения

Касьяненко Н.С. — участие в формировании выводов и заключении, доработка текста, формирование списка литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kudrevatykh V.V. Research of requirement management features in the field of project management in a full-cycle engineering company. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2020; 15(8):1175-1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1175-1190 (rus.).

2. Lapidus A.A., Chapidze O. D Improving the analysis of technical risk factors using the integrated FLDS model on the example of the construction of multi-storey residential buildings. *Vestnik*

MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2021; 16(12):1608-1619. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1608-1619. (rus.).

3. Wang Y., Chen X. Risk management for construction material supply chain : a review. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020.

4. Shcherbanin Yu.A., Shikov V.O. Risk events and their characteristics. *Scientific Proceedings of INP RAS*. 2019; 17:54-74. DOI: 10.29003/m811.sp_ief_ras2019/54-74 (rus.).

5. Ono T. The Toyota production system. *Moving away from mass production*. Moscow, Institute for Complex Strategic Research, 2008; 121-125. (rus.).
6. Hammad Al-Nasseri, Kristian Widén, Radh-linah Aulin. A taxonomy of planning and scheduling methods to support their more efficient use in construction project management. *Journal of Engineering Design and Technology*. 2016; 14(1):580-601. DOI: 10.1108/JEDT-11-2013-0078
7. Polyakov A.N. American technocrats. *Henry Lawrence Gantt. Management: journal*. 2021; 1(57):58-63. (rus.).
8. Morris P.W.G., Pinto J.H. The Gantt chart: A century of evolution. *Project Management Journal*. 2019.
9. *Practice Standard for Work Breakdown Structure*. 3rd ed. Project Management Institute. Newtown Square, PA. 2019. USA.
10. Zein M.A., Al-Salman A.M. A review of hierarchical structures in project management. *International Journal of Project Management*. 2021.
11. Supriyono, Nur Chasanah. Software development project management based on work breakdown structure and ODOO ERP. *Jurnal Teknik Informatika (JUTIF)*. 2023; 4(4):893-898. DOI: 10.52436/1.jutif.2023.4.4.1077
12. Srivastava R.K., Jain S.K. A multi-level approach to project planning and control. *International Journal of Project Management*. 2020.
13. Ali J.H., Al-Suliman S.A. A comparative study of network scheduling techniques for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020.
14. Ryan G. Even more schedule for sale. Advanced work packaging for construction projects. *Author-House*. Bloomington, Indiana, USA. 2017; 135.
15. Al-Hussein M.R., Odeh M.T. Advanced work packaging: An innovative approach to construction planning and execution. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2017.
16. Bradley Copeland. Digital advanced work packaging — a case study in construction-led delivery. *The APPEA Journal*. 2023; 63(2):S169-S172. DOI: 10.1071/AJ22046
17. Kulakov K.Yu., Orlov A.K., Kanhwa V.S. Value chains in construction based on the concept of lean manufacturing in the conditions of digital transformation. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2023; 18(10):1647-1660. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1647-1660
18. Zhang X., Azhar S., Nadeem A., Khalfan M. Using Building Information Modelling to achieve Lean principles by improving efficiency of work teams. *International Journal of Construction Management*. 2018; 18(4):293-300. DOI: 10.1080/15623599.2017.1382083
19. Porter M.E., Heppelmann J.E. How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*. November 2014. URL: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>

Received October 24, 2023.

Adopted in revised form on January 17, 2024.

Approved for publication on January 20, 2024.

B I O N O T E S: **Lyudmila A. Oparina** — Assistant professor, Doctor of Technical Sciences, head of Department of organization of production and urban economy, advisor RAACS; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevsky ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; ID RSCI: 558560, Scopus: 57128068100, ResearcherID: V-5060-2017, ORCID: 0000-0001-5534-727X; L.A. Oparina@gmail.com;

Evgenii A. Barzygin — Associate Professor of the Department of Production Organization and Urban Economy; Doctor of Technical Sciences, head of Department of organization of production and urban economy; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevsky ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; barzygin@mail.ru;

Yaroslava A. Gridneva — Associate Professor of the Department of Production Organization and Urban Economy; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevsky ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 8504-1658, ORCID: 0000-0003-1570-7087; yaroslava.l.a1@gmail.com;

Natalya S. Kasyanenko — Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of Department of Natural Sciences and Technosphere Safety; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevsky ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; ID RSCI: 558560, Scopus: 58567398000, ORCID: 0000-0002-4046-9300; kasiyanenko@gmail.com.

Contribution of the authors:

Lyudmila A. Oparina — scientific guidance, research concept.

Evgenii A. Barzygin — carrying out calculations, participation in the selection of methodology and research methods, writing the source text, final conclusions.

Yaroslava A. Gridneva — formation of keywords and introduction.

Natalya S. Kasyanenko — participation in the formation of conclusions and conclusions, revision of the text, creation of a list of references.

The authors declare no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).
2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель 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.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391032146430000000017300

(ИНН получателя платежа)(номер счета получателя платежа)

вГУ Банка России по ЦФОБИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК00000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

3 822

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391032146430000000017300

(ИНН получателя платежа)(номер счета получателя платежа)

вГУ Банка России по ЦФОБИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК00000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

3 822

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@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/>



