

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 11/2023
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 18. Выпуск 11
2023**

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

Сквозной номер 180

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 18. Issue 11
2023**

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	28.11.2023.
Подписан в свет	30.11.2023.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 21,25. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 363

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	28.11.2023

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2023

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

А.В. Попов, А.А. Семенчукова
Анализ генеральных планов вузов СССР 1970–1980-х гг. 1683

А.И. Клименко, М.Ю. Гайдук
Торговый дом купца А.С. Колмакова в г. Тюмени. Опыт комплексных исследований, реставрации
и приспособления объекта 1692

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

О.В. Мкртычев, Р.А. Зайцев
Исследование влияния этажности железобетонных каркасов на деградацию собственных частот
и характер разрушения при землетрясении. 1704

В.А. Дагаев, Г.М. Пурвин, Ф.С. Школяр
Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок
на вантовое покрытие двоякой кривизны. 1713

Г.М. Бажин
Оптимальные размеры стальных сварных балок с шарнирными опорными узлами 1731

А.М. Белостоцкий, И.Ю. Негрозова, О.С. Горячевский
Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни 1745

А.Р. Туснин, В.Д. Платонова
Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях
на напряженно-деформированное состояние узла 1763

Г.И. Белый, А.Е. Кубасевич
Влияние усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок. 1780

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Ф. Гордина, И.С. Полянских, А.Н. Гуменюк, Т.А. Плеханова
Особенности формирования структуры и свойств природного ангидрита при комплексной активации . . 1791

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.В. Чуйкин
Разработка методики и программы расчета параметров воздуха при кондиционировании и вентиляции
крытых катков 1802

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.И. Евтушенко, М.Д. Куценко
Использование технологии дополненной реальности на этапах жизненного цикла объекта капитального
строительства 1813

Р.Р. Козаков, В.А. Кощеев
Распределение транзакционных издержек в инвестиционно-строительной сфере Российской Федерации . 1821

Н.А. Солопова, Ж.В. Селезнева
Анализ применения цифровых технологий в государственном и муниципальном управлении. 1836

Требования к оформлению научной статьи 1846

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Aleksey V. Popov, Alexandra A. Semenchukova
Analysis of general plans of the USSR universities in 1970–1980. 1683

Aleksandr I. Klimenko, Maria Yu. Gaydouk
**Trading house of merchant A.S. Kolmakov in Tyumen. Experience of complex research, restoration
and adaptation of the object 1692**

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

Oleg V. Mkrtychev, Roman A. Zaitsev
**Studies of the influence of the number of storeys of reinforced concrete frames on the degradation of natural
frequencies and character of earthquake damage 1704**

Vladislav A. Dagaev, Georgii M. Purvin, Filipp S. Shkoliar
**Optimization of determination and application of complexly distributed loads on a double curvature
cable-stayed covering. 1713**

Grigoriy M. Bazhin
Optimal dimensions of steel welded beams with hinged support units 1731

Alexander M. Belostotsky, Irina Yu. Negrozova, Oleg S. Goryachevsky
Estimation of aeroelastic stability of a tower spire 1745

Alexander R. Tusnin, Valeria D. Platonova
**Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of
the unit 1763**

Grigory I. Belyy, Anton E. Kubasevich
Effect of fatigue cracks in the wall on the strength of crane beams. 1780

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Anastasia F. Gordina, Irina S. Polyanskikh, Aleksandr N. Gumeniuk, Tatiana A. Plekhanova
Structure formations and properties of natural anhydrite at complex activation 1791

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Sergey V. Chuykin
**Development of methodology and programme for calculation of air parameters for air conditioning
and ventilation of indoor skating rinks 1802**

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Sergej I. Evtushenko, Maksim D. Kuzenko
**Use of augmented reality technology at the stages of the life cycle of a capital construction
facility 1813**

Roman R. Kozakov, Vadim A. Koshcheev
Distribution of transaction costs in the investment and construction sector of the Russian Federation 1821

Natalia A. Solopova, Zhanna V. Selezneva
Analysis of the use of digital technologies in state and municipal government 1836

Requirements for research paper design 1846

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на тему:

«Методология комплексного управления техническим потенциалом строительного производства».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета
НИУ МГСУ 19.12.2023 в 14.00.

С порядком проведения конкурсного отбора можно ознакомиться на официальном сайте НИУ МГСУ (mgsu.ru).

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1683-1691

Анализ генеральных планов вузов СССР 1970–1980-х гг.

Алексей Владимирович Попов, Александра Андреевна Семенчукова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен важный и интересный период развития архитектуры вузов в нашей стране, характеризующийся комплексным подходом и массовым внедрением передовых для того времени решений. Особую актуальность тема приобретает в настоящее время, когда определяется стратегия будущего развития университетских кампусов, необходимость которого отмечена в национальном проекте «Наука и университеты», федеральном проекте «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» и др. Большая часть генеральных планов российских вузов утверждена в эпоху СССР. Сегодня актуальной задачей становится определение возможностей дальнейшего расширения и совершенствования высших учебных заведений с точки зрения их архитектурно-планировочных особенностей и потенциала, заложенного в генеральных планах вузов архитекторами прошлого.

Материалы и методы. Изучены действующие в то время нормативные документы, регламентирующие проектирование вузов, научные исследования и пособия для практиков, проектная документация. Акцент сделан на анализе генеральных планов и градостроительного размещения вузов в структуре поселений.

Результаты. Отмечен ряд характерных тенденций и применявшихся архитекторами и градостроителями решений. Рассмотрены общие приемы формирования университетских комплексов в СССР в 1970–1980 гг. Проанализированы отдельные характерные примеры и приведены схемы с цветовой индикацией реализованных объектов генерального плана. Несмотря на увеличение количества обучающихся и набирающее обороты строительство зданий и комплексов высшей школы, потенциал, заложенный в генеральных планах многих вузов рассматриваемой эпохи, до сих пор не исчерпан.

Выводы. Генеральные планы вузов, разработанные в эпоху СССР, отличаются продуманной планировочной структурой, учитывающей большинство потребностей среднестатистического студента того времени. Благодаря общим принципам зонирования с возможностью линейного или центрального развития каждой зоны такие планировки ориентированы на динамичное развитие в пространстве с течением времени с возможностью адаптации к современным требованиям функционального наполнения отдельных зон.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вуз, архитектура вузов, университет, пространственная организация вузов, высшие учебные заведения СССР, генеральные планы вузов, кампусы высших учебных заведений, система высшего образования СССР

Благодарности. Статья подготовлена в рамках проекта № 23 «Границы города в разнообразии типологии, архитектурных образах и смыслах. Исторические преобразования и новые предложения» в рамках фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами НИУ МГСУ (Приказ от 23.03.2023. № 258/130).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Попов А.В., Семенчукова А.А. Анализ генеральных планов вузов СССР 1970–1980-х гг. // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1683–1691. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1683-1691

Автор, ответственный за переписку: Алексей Владимирович Попов, da945@yandex.ru.

Analysis of general plans of the USSR universities in 1970–1980

Aleksey V. Popov, Alexandra A. Semenchukova

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

ABSTRACT

Introduction. Within the framework of this study, an important and interesting period of the development of higher school architecture in our country is considered, characterized by an integrated approach and the mass introduction of advanced solutions for that time. The topic is particularly relevant nowadays, when the strategy for the future development of university campuses of our country is being determined, the necessity of which is noted in the national project “Science and Universities”, the federal project “Development of infrastructure for scientific research and personnel training” and other documents of the federal and regional levels. Most of the general plans of existing Russian universities were approved during the Soviet period. At the present stage of the development of educational infrastructure in Russia, an important task is to determine the possibilities for further expansion and improvement of higher educational institutions in terms of their architectural and planning features and the potential laid in the master plans of higher educational institutions by architects of the past.

Materials and methods. In order to study the design features, characteristic solutions and trends in the architecture of complexes of higher educational institutions of the period under review, the normative documents in force at that time, regulating the design of higher educational institutions, scientific research and manuals for practitioners, project documentation were studied. The emphasis is made on the analysis of general plans and urban planning placement of higher educational institutions in the structure of settlements.

Results. A number of characteristic tendencies and solutions used by architects and urban planners are noted. The general methods of forming university complexes in the USSR in the period 1970–1980 are considered. Individual characteristic examples are analyzed and schemes with colour indication of implemented objects of the general plan are given to illustrate the development of universities. Despite the continuing increase in the number of students and the construction of buildings and complexes of higher education that is gaining momentum in the construction, the potential laid down in the general plans of many universities of the period under consideration is still not exhausted. It is possible to note the comprehensive approach of architects of the period to the development of master plans of universities. In accordance with the principles of planning, zoning and spatial connectivity laid down in the Soviet period, university complexes are successfully functioning at the present time.

Conclusions. The general plans of universities developed during the Soviet period are characterized by a well-thought-out planning structure that takes into account most of the needs of the average student of that time. Due to the general principles of zoning with the possibility of linear or centric development of each zone, such layouts are focused on dynamic development in space over time with the possibility of adapting to modern requirements of functional filling of individual zones.

KEYWORDS: higher education institution, architecture of universities, university, spatial organization of universities, higher educational institutions of the USSR, general plans of universities, campuses of higher educational institutions, the system of higher education of the USSR

Acknowledgments. The article was prepared within the framework of project No. 23 “City boundaries in a variety of typologies, architectural images and meanings. Historical transformations and new proposals” within the framework of fundamental and applied scientific research (R&D) by scientific teams of the National Research University MGSU (Order No. 258/130 dated March 23, 2023).

FOR CITATION: Popov A.V., Semenchukova A.A. Analysis of general plans of the USSR universities in 1970–1980. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1683-1691. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1683-1691 (rus.).

Corresponding author: Aleksey V. Popov, da945@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Кампус высшего учебного заведения — многофункциональный комплекс зданий, предназначенный для размещения подразделений вуза, связанных системой особых общественных пространств, формирующих единую среду для высшего образования (ВО), научных исследований, а также широкого спектра сопутствующих функций в системе «труд – быт – отдых» всех уровней для участников данных процессов [1]. Кампус вуза понимается как материальная среда существования учреждения высшей школы во всем спектре функций. Кампусы современных вузов являются не только местом обучения, но и пространством научных исследований, общения, проживания, быта, отдыха и т.д.

Особую актуальность тема развития таких объектов приобретает в настоящее время, когда планируется развернуть широкое строительство университетских кампусов в нашей стране, необходимость которого отмечена в ряде программ развития федерального и регионального уровней, в том числе в национальном проекте «Наука и университеты». В 1990-х и 2000-х гг. новые здания вузов строились в нашей стране в относительно небольшом количестве. В ряде случаев продолжалось строительство в соответствии с ранее разработанными еще при СССР проектами (например, достраивались корпуса комплекса МИТХТ на проспекте Вернадского и учебно-лабораторный корпус МГТУ им. Н.Э. Баумана в г. Москве). В конце XX – начале XXI в. крупнейшие профильные проектные институты, такие как Центральный научно-исследовательский

и проектный институт типового и экспериментального проектирования школ, дошкольных учреждений, средних и высших учебных заведений (ЦНИИЭП учебных зданий), Государственный институт по проектированию высших учебных заведений (ГИПРОВУЗ) и их региональные и республиканские филиалы, прекратили свое существование [1]. Таким образом, обращение к опыту 1970–1980-х гг. представляется особенно актуальным.

Период 1970–1980-х гг. важен для изучения ввиду успешного решения в указанные годы сложнейшей задачи — массового строительства зданий и комплексов высших учебных заведений в областных и республиканских центрах. Как отмечал министр высшего и среднего специального образования В.П. Елютин, за период 1975–1980 гг. было необходимо подготовить 3,4 млн высококвалифицированных специалистов, не только обладающих научными и практическими знаниями, но и культурно, политически и физически образованных. Именно в 1970–1980 гг. наступил «расцвет» системы высшего образования СССР — количество работников с ВО увеличилось почти вдвое. Для выполнения плановых показателей было построено или реорганизовано 93 комплекса высших учебных заведений [2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью исследования особенностей проектирования, выявления характерных решений и тенденций в архитектуре кампусов (в терминологии 1970–1980-х гг. — комплексов) вузов рассматри-

ваемого периода изучены действующие в то время нормативные документы, регламентирующие проектирование высших образовательных заведений, научные исследования и пособия для практиков, проектная документация. Акцент сделан на анализе генеральных планов и градостроительного размещения вузов в структуре поселений. Наиболее полезными в настоящем исследовании оказались учебные пособия и сборники ЦНИИЭП учебных зданий¹, ЦНИИЭП жилища² и ГИПРОВУЗ.

Исследование генеральных планов вузов было дополнено изучением их реализации и современного состояния кампусов данных вузов. Основным методом стал системный анализ. Исследование проводилось с учетом планируемого развития и реализованного потенциала; проектной и реальной численности учащихся; профиля образовательной организации; развития городской инфраструктуры вблизи территории вуза; количества возведенных по генеральному плану зданий; наличия зданий и функциональных объектов, не предусмотренных генеральным планом.

Для наглядной иллюстрации развития вузов приведены схемы с цветовой индикацией реализованных объектов генерального плана.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая различие учебных программ, специфику проводимых научных исследований, значительные территории, занимаемые комплексами высших учебных заведений, и градостроительный контекст, типовое проектирование применялось ограниченно (можно отметить только значительное распространение типовых и повторное применение проектов зданий общежитий). Однако имеется ряд характерных тенденций применявшихся архитекторами и градостроителями решений:

- расположение вузов с учетом планировочной структуры города (политехнические институты располагались вблизи промышленных зон, сельскохозяйственные — ближе к периферии города, медицинские вузы кооперировались с городскими поликлиниками и больницами). Пример характерной схемы приведен на рис. 1;
- комплексы вузов объединяют на одной территории учебные, научные и иные подразделения, а также общежития и выполняются в виде единых выразительных архитектурных ансамблей;
- широко применяются связи зданий комплексов внеуличными переходами (как правило, в уровне

второго этажа) и использование подземного пространства;

- зонирование территорий комплексов вузов предусматривало выделение учебной, научно-производственной, общественной, культурно-бытовой, жилой, физкультурно-оздоровительной и других зон;
- объединение малых высших учебных заведений в комплексы, создание крупных межвузовских «вузов-городков».

Парадигма позднесоветского ВО вобрала в себя целостную систему теорий и концепций, определяющих номенклатуру, иерархию знаний, умений и навыков, методику их проектирования, формирования, контроля и диагностики в учебно-воспитательном процессе. В соответствии с ней были разработаны теории структуры содержания профессионального образования и технологии обучения студентов [3–5].

Согласно задачам наращивания массового выпуска кадров с высшим образованием во второй половине XX в. в СССР активно проектируются и строятся здания и комплексы высшей школы. Проекты комплексов новых вузов данного периода предполагают также значительные резервы территории под дальнейшее расширение — строительство новых общежитий, учебных и научных корпусов. Учебные и научные здания вузов строятся по индивидуальным

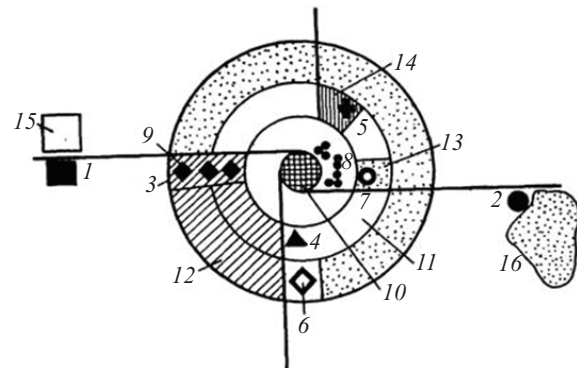


Рис. 1. Принципиальная схема размещения вузов в городе, характерная для рассматриваемого периода (авторы схемы Г. Цытович, Г. Кретова): 1 — университет, институты; 2 — сельскохозяйственный; 3 — технический; 4 — экономический; 5 — медицинский; 6 — политехнический; 7 — физической культуры; 8 — институт культуры и искусства; 9 — крупный вузовский комплекс; 10 — центр города; 11 — жилищная застройка; 12 — промышленная зона; 13 — парковая зона; 14 — зона больниц и клиник города; 15 — академгородок; 16 — совхозные земли

Fig. 1. The schematic diagram of universities location in the city, typical for the period under consideration (authors of the scheme G. Tsytovich, G. Kretova): 1 — university; institutes; 2 — agricultural; 3 — technical; 4 — economic; 5 — medical; 6 — polytechnic; 7 — physical culture; 8 — institute of culture and art; 9 — large university complex; 10 — city center; 11 — residential development; 12 — industrial call; 13 — park area; 14 — area of hospitals and clinics of the city; 15 — academic city; 16 — state farm lands

¹ Проектирование высших учебных заведений и институтов повышения квалификации. Справочное пособие к СНиП 2.08.02–89. М.: Стройиздат, 1992. 315 с.

² Абрамова Р.П., Гарнец А.М., Царева Н.К. и др. Общежития для молодежи. ЦНИИЭП жилища, ЦНИИЭП учебных зданий / науч. ред. Б.Ю. Брандербург. М.: Стройиздат, 1990. 128 с.

проектам, массово разрабатываемым профильными проектными институтами по заказу Госстроя, и согласуются в установленном порядке. Архитектурных конкурсов на подобные проекты практически не проводится. Общежития для студентов и аспирантов в подавляющем большинстве строятся по типовым проектам и проектам повторного применения. Необходимость обеспечения массовости строительства приводит к широкому применению даже в индивидуальных проектах стандартных сборных железобетонных элементов, изготавливаемых предприятиями по производству железобетонных изделий того времени, что очевидно снижало возможности и свободу творчества архитекторов. В облике строений преобладает модернизм. В отделке зданий высшей школы данного периода центральное место занимает дерево, алюминий, керамика и натуральный камень (преимущественно мрамор и гранит). В целом здания высшей школы рассматриваемого этапа в своем облике отражают социально-экономические, а также социокультурные особенности и противоречия общества позднего Советского Союза. Интенсивное массовое строительство зданий и комплексов вузов продолжалось до конца существования СССР. Из облика здания окончательно уходит классический образ учреждения высшей школы, характерный для

предыдущих периодов, здания подчеркнуто современные, технологичны [1].

Архитекторами того времени учитывались перспективы развития вузов на достаточно большой горизонт. Были заложены территории для строительства новых зданий и инфраструктуры.

Проекты учебных корпусов очень разнообразны, планировочные решения — функциональны. Впервые массово появляются отдельные корпуса и блоки поточных аудиторий, достаточно широко применяются внеуличные отапливаемые переходы между зданиями вуза, растет этажность. Аудитории оборудуются современными техническими средствами: графопроекторами, диапроекторами, средствами усиления звука, пленочными кинопроекторами, полиэкранными телевизионными системами. Преобладающий материал несущих конструкций — железобетон. Здания, как правило, каркасной конструктивной схемы, позволяющей обеспечить наибольшую гибкость объемно-планировочных решений [1].

Предполагалось, что отдельные зоны учебного корпуса могут развиваться как обособленно, так и с взаимопрониканием, что было характерно для наиболее крупных вузов. Общественный центр вуза (рис. 2), как правило, занимал центральное положение в планировочной схеме. С ним соседствовали учебно-административная зона и научно-лаборатор-

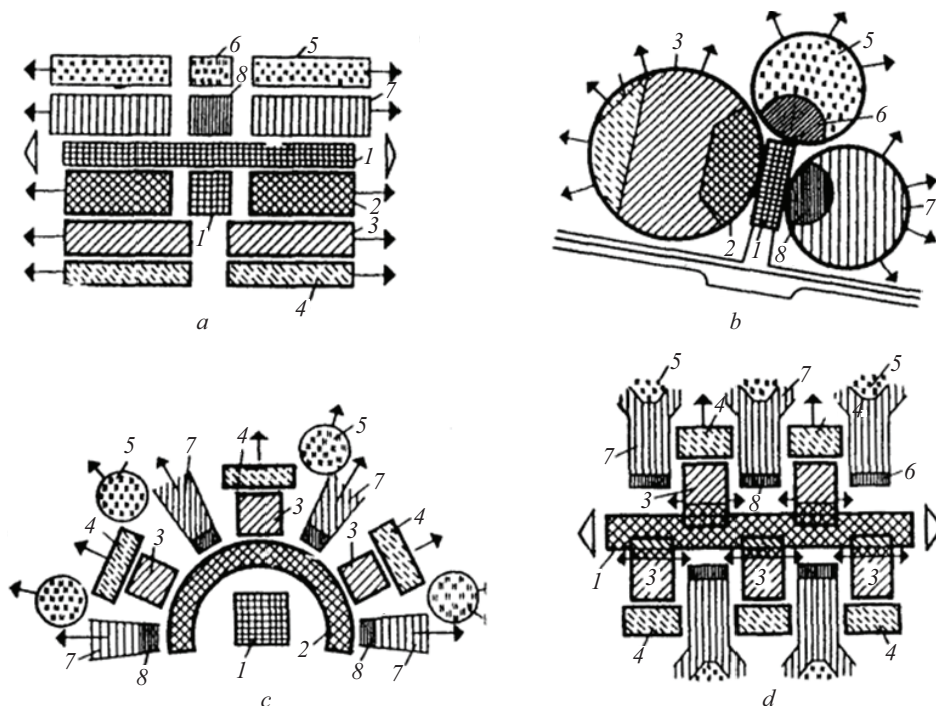


Рис. 2. Теоретические схемы пространственного развития высших учебных заведений рассматриваемого периода (автор схем Г. Цытович). Основные схемы пространственного развития: линейная (а, b); центричная (с, d); 1 — общественный центр вуза; 2 — учебная зона; 3 — зона научно-учебных подразделений вуза; 4 — научно-производственная зона; 5–7 — зона общежитий; 8 — культурно-бытовая зона

Fig. 2. Theoretical schemes of spatial development of higher educational institutions of the considered period (the author of the schemes G. Tsytoich). The main schemes of spatial development are: linear (a, b); centric (c, d); 1 — public center of the university; 2 — educational zone; 3 — zone of scientific and educational units of the university; 4 — scientific and production zone; 5–7 — zone of dormitories; 8 — cultural and household zone

ные корпуса, на периферии располагались жилые, спортивные и коммунальные зоны.

Приоритет отдавался компактным, многофункциональным учебным комплексам, способным обеспечить студентов как местами проживания в непосредственной близости к учебным и научным корпусам, так и частично удовлетворить иные их потребности. В большинстве проектов учитывалась необходимость обеспечения потребностей студентов в физической активности, досуге, культурном развитии. В практике проектирования жилых и учебных корпусов наблюдалось разнообразие планировочных схем, архитектура которых более подробно рассмотрена в работах [6–9].

В качестве спорного момента следует отметить проявившееся в 1980-х гг. опережение высшей школой потребностей экономики в высококвалифицированных специалистах. В данный период количество вузов и число обучающихся непрерывно росло [1, 10] и к 1990 гг. количество вузов приблизилось к 900, а студентов — к 5 млн человек. Некоторые исследователи критикуют высшее образование 1980–1990 гг. за излишний акцент на количественные «валовые» показатели [5, 10].

Анализ проектов генеральных планов вузов указанного периода и современного их материального воплощения показал, что комплексы многих вузов до сих пор не реализованы в проектом объеме. В качестве примера можно привести Волгоградский государственный университет (ВолГУ) (рис. 3). Гене-

ральный план подразумевал строительство комплекса на 6 тыс. студентов. В наше время в вузе обучаются около 12 тыс. студентов, при этом реализовано было меньше половины объектов от предлагаемых изначальным проектом. Возведено ядро учебных корпусов, одно из четырех студенческих общежитий, на месте предполагаемой библиотеки построено здание приемной комиссии. Благоустроено футбольное поле и бульвар. Территория университета, не занятая застройкой, позволяет осуществлять постепенное строительство новых корпусов.

Другой пример — Обнинский институт атомной энергетики — филиал НИЯУ МИФИ (рис. 4), в котором сейчас обучается около 3 тыс. студентов, что чуть меньше проектной численности. По генеральному плану были построены почти все учебные корпуса, половина общежитий, хозяйственные сооружения, ФОК, благоустроены спортивные площадки. Не реализованы поликлиника и общественный центр, строительство которых могло бы способствовать развитию студенческого городка, учитывая расположение института на периферии города. Вместе с тем возведен архив, а вместо нескольких научных корпусов — здание технопарка.

Среди причин неполной реализации проектов можно выделить постепенное снижение объемов финансирования ВО с 1980-х и обвальное с 1990-х гг., а также неравномерность развития в более поздние периоды. Отдельные вузы — региональные и феде-

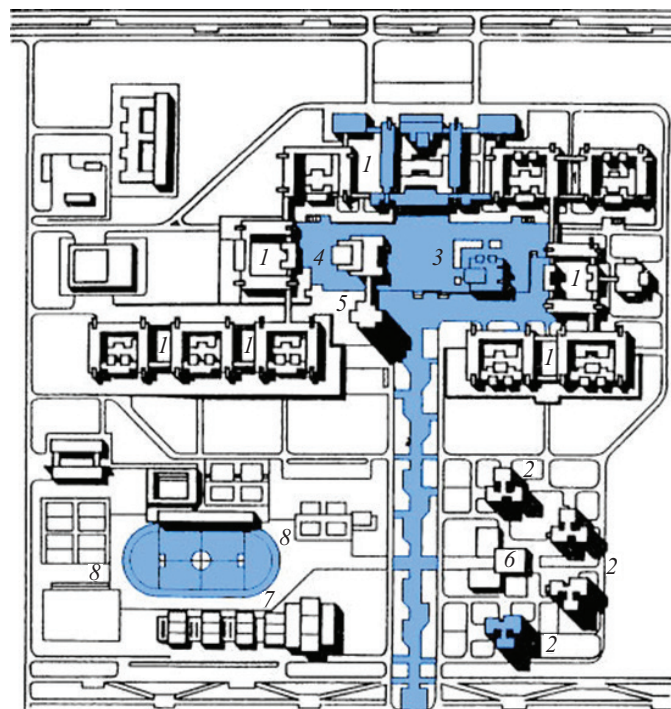


Рис. 3. Генеральный план ВолГУ (архитекторы В. Бондаренко, Ю. Зимин, И. Каравайкина), голубым цветом показана реализованная часть плана: 1 — учебные корпуса; 2 — здания студенческих общежитий; 3 — библиотека; 4 — актовыв зал; 5 — ректорат; 6 — общественно-торговый центр со столовой; 7 — спортивный корпус; 8 — спортивные площадки

Fig. 3. The general plan of the Volgograd State University (architects V. Bondarenko, Y. Zimin, I. Karavaikina), the blue colour shows the implemented part of the plan: 1 — academic buildings; 2 — buildings of student dormitories; 3 — library; 4 — assembly hall; 5 — rectorate; 6 — public shopping center with dining room; 7 — sports building; 8 — sports grounds

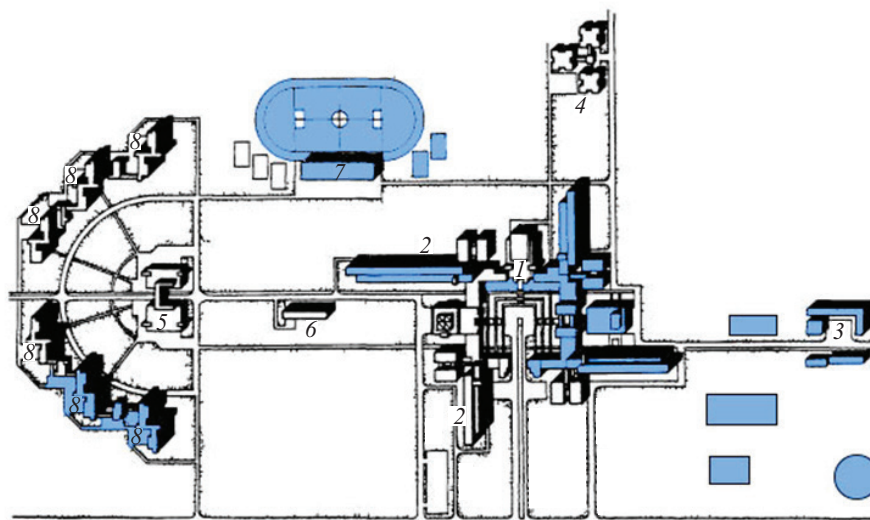


Рис. 4. Генеральный план Обнинского института атомной энергетики — филиала НИЯУ МИФИ (архитекторы Н. Уручмян, А. Патронов, А. Рябцева), голубым цветом показана реализованная часть плана: 1 — административный корпус; 2 — учебные корпуса; 3 — хозяйственные сооружения; 4 — научные корпуса; 5 — культурно-бытовой и общественный центры; 6 — поликлиника с профилакторием; 7 — спортивные сооружения; 8 — общежития с блоками первичного обслуживания

Fig. 4. The general plan of the Obninsk MEPhI Research Institute (architects N. Urutchyan, A. Patronov, A. Ryabtseva), the blue colour shows the implemented part of the plan: 1 — administrative building; 2 — educational buildings; 3 — economic buildings; 4 — scientific buildings; 5 — cultural and social centers; 6 — polyclinic with a dispensary; 7 — sports facilities; 8 — dormitories with primary service blocks

ральные научные центры, крупнейшие отраслевые вузы, находясь в условиях большого доступа к ресурсам для развития, реализовали первоначальный замысел архитекторов в наибольшей мере.

В качестве примера рассмотрим Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (рис. 5). Вуз расположен в Ярославском районе г. Москвы. Территория под строительство выделялась в конце 1970-х гг. На данном месте располагались малоэтажная жилая застройка бывшего г. Бабушкин и хозяйственные постройки. Строительство большей части корпусов осуществлено в период 1980–1985 гг. Генеральный план кампуса реализован в значительной степени: построена большая часть запланированных учебных корпусов, общежития, а также спортивные комплексы. Часть спортивных объектов (спортивный манеж, бассейн) и учебно-лабораторный корпус сданы в эксплуатацию после 2005 г. Комплекс вуза по-прежнему развивается в русле, заложенном изначальным проектом архитекторов В. Степанова, Р. Мелкуляна, Д. Ольбинского, Я. Студникова. Новый учебный корпус в соответствии с исходной задумкой соединен с остальными зданиями отапливаемым внеуличным переходом в уровне второго этажа и продолжает полукольцо учебных корпусов, спортивные объекты построены в целом согласно исходному генеральному плану.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подводя итоги анализа, можно сделать вывод, что в 1970–1980 гг. было разработано большое ко-

личество генеральных планов, предусматривавших строительство и перспективу функционирования множества высших учебных заведений разных размеров и направленности. Наблюдается комплексный подход архитекторов того периода к разработке генеральных планов вузов. В соответствии с заложенными в советскую эпоху принципами планировки, зонирования и пространственной связности комплексы вузов успешно функционируют и в настоящее время. Проведенный анализ современного состояния вузов показал, что на данный момент планировочный потенциал вузов по ряду причин все еще не раскрыт полностью и в дальнейшем развитии таких учреждений можно опираться на изначальный замысел, внося коррективы в соответствии с современными тенденциями и новыми задачами.

Генеральные планы вузов, разработанные в эпоху СССР, отличаются продуманной планировочной структурой, учитывающей большинство потребностей среднестатистического студента того времени. Благодаря общим принципам зонирования с возможностью линейного или центричного развития каждой зоны, данные планировки ориентированы на динамичное развитие в пространстве с течением времени с возможностью адаптации к современным требованиям функционального наполнения отдельных зон.

Заметно несколько недостаточное внимание во многих проектах анализируемого этапа к формированию общественных пространств, тогда как авторам и многим другим исследователям [11–16] такие пространства представляются важной составной частью кампусов вузов. Важным моментом

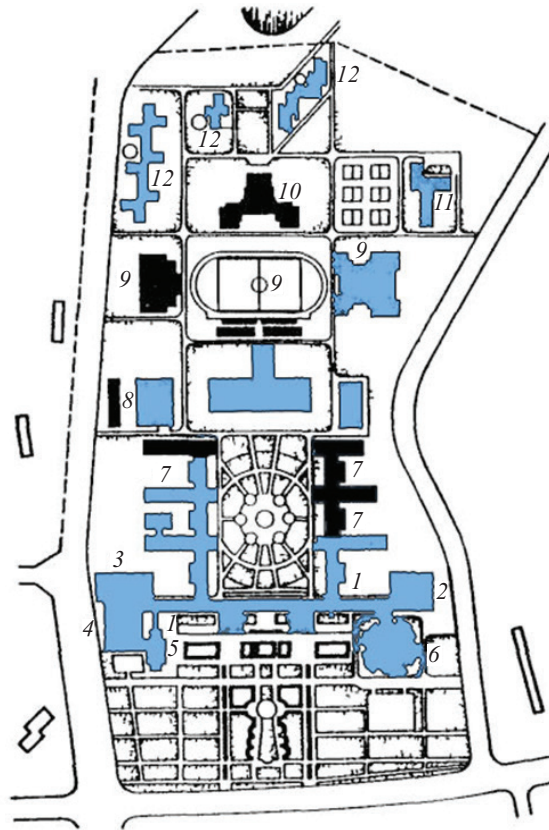


Рис. 5. Генеральный план НИУ МГСУ (архитекторы В. Степанов, Р. Мелкумян, И. Доронина, при участии Я. Студникова и Л. Ольбинского), голубым цветом показана реализованная часть плана: 1 — корпус младших курсов; 2 — столовая; 3 — библиотека; 4 — актовый зал; 5 — ректорат; 6 — аудиторный блок; 7 — факультеты; 8 — хозяйственные корпуса; 9 — дворец спорта, бассейн, манеж, стадион; 10 — культурно-бытовой центр; 11 — профилакторий; 12 — общежития

Fig. 5. The general plan of the NRU MGSU (architects V. Stepanov, R. Melkumyan, I. Doronina, with the participation of Ya. Studnikov and L. Olbinsky), the implemented part of the plan is shown in blue: 1 — junior courses building; 2 — dining room; 3 — library; 4 — assembly hall; 5 — rectorate; 6 — classroom block; 7 — faculties; 8 — economic buildings; 9 — sports palace, swimming pool, arena, stadium; 10 — cultural and household center; 11 — dispensary; 12 — dormitories

является также связь общественных пространств вуза с системой общественных пространств поселения [17, 18], авторы проектов рассматриваемого периода уделяли ей, как представляется, недостаточное внимание.

В дальнейших исследованиях целесообразно изучить влияние новейших тенденций в сфере ВО на требования к архитектурно-планировочной

организации, проанализировать, насколько изначальная планировка кампусов вузов способна трансформироваться к новым запросам, и дать рекомендации по совершенствованию учебных, общественных, жилых и других зон университетских кампусов. Представляется перспективным углубленное изучение региональных особенностей [19, 20] в их влиянии на проектирование объекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов А.В. Концепция архитектурного формирования кампусов вузов в России : дис. ... д-ра арх. Нижний Новгород, 2022. 622 с.
2. Елютин В.П. Высшая школа общества развитого социализма. М. : Высшая школа, 1980. 560 с.
3. Логвинович Г.В. Развитие и кризисные черты в системе высшего образования СССР в 1970–1980-х годах // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2018. № 3 (192). С. 186–193. DOI: 10.23951/1609-624X-2018-3-186-193. EDN THGWUF.

4. Гусарова М.Н. Исторический опыт формирования инженерно-технической интеллигенции в советской высшей технической школе в 1950–1980-е гг. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2010. № 1 (72). С. 197–204. EDN MUQXVH.
5. Лисицкий Д.В., Осипов А.Г., Кичеев В.Г., Савиных В.Н., Макаренко Н.Н. Динамика парадигм высшего образования России (конец XIX – начало XXI вв.) //

Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2017. Т. 7. № 3. С. 157–175. DOI: 10.15293/2226-3365.1703.10. EDN ZFROGR.

6. Popov A.V. Architectural examination of student accommodation in Russia and the CIS // Amazonia Investiga. 2019. Vol. 8. Issue 19. Pp. 179–190. EDN ZGRBIT.

7. Попов А.В., Сырова О.И. Вопросы архитектурно-градостроительной типологии кампусов вузов // Инновации и инвестиции. 2021. № 1. С. 157–161. EDN HAGXTU.

8. Попов А.В., Сырова О.И. Вопросы типологии открытых общественных пространств кампусов вузов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2021. № 3 (35). С. 116–125. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-35-3-116-125. EDN CZBMNB.

9. Попов А.В. Принципы формирования архитектуры студенческого жилища высших учебных заведений : дис. ... канд. арх. М., 2014. 274 с.

10. Волков С.В. Интеллектуальный слой в советском обществе. М. : Некоммерческая организация фонд «Развитие»; Институт научной информации по общественным наукам РАН, 1999. 250 с. EDN YUTAKX.

11. Алексеев Ю.В. Основы планирования, проектирования поселений региона и организации и координации профессиональной деятельности : монография. М. : Изд-во АСВ, 2022. 295 с.

12. Ахмедова Е.А. Постиндустриальный вызов — архитектура общественных пространств // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 1. С. 144–145. EDN IMGSQJ.

13. Гельфонд А.Л. Концепция формирования потенциальных пространственных каркасов исторических поселений // Academia. Архитектура и стро-

ительство. 2019. № 1. С. 26–34. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-1-26-34. EDN PBVNPJ.

14. Гельфонд А.Л. Типологические аспекты дематериализации архитектурной среды // Современная архитектура мира: основные процессы и направления развития : тез. докл. XIII Междунар. науч. конф. 2022. С. 6–7. EDN IVGMAU.

15. Дуцев М.В. Архитектурно-художественное формирование открытых городских пространств (на примере европейских городов) // Архитектон: известия вузов. 2012. № 4 (40). С. 4. EDN PJSVQZ.

16. Палей Е.С. Общественное пространство европейского университета в процессе исторического развития // Архитектон: известия вузов. 2019. № 1 (65). С. 3. EDN BPKCRS.

17. Гельфонд А.Л. Общественное здание и общественное пространство. Дуализм отношений // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 2. С. 18–31. EDN UGUXAZ.

18. Фильченков К.С. Транзитные пространства города как отражение городских конфликтов // Приволжский научный журнал. 2020. № 1 (53). С. 225–231. EDN RSAHNT.

19. Шалболова У.Ж., Егембердиева С.М., Чикибаева З.Н. Строительство студенческих общежитий в Казахстане — расширение вузовской жилищной инфраструктуры // Жилищное строительство. 2021. № 8. С. 18–26. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-8-18-26. EDN CWCPLK.

20. Finogenov A.I., Popov A.V. Concept of planning development of coastal resort settlements under conditions of complex relief // Journal of Environmental Management and Tourism. 2019. Vol. 10. Issue 1. P. 135. DOI: 10.14505/jemt.10.1(33).13

Поступила в редакцию 24 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Алексей Владимирович Попов — доктор архитектуры, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; da945@yandex.ru;

Александра Андреевна Семенчукова — студентка; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; sasha.semenchukova@gmail.com.

Вклад авторов:

Попов А.В. — написание текста статьи, сбор и обработка материала, составление модели и программы исследования.

Семенчукова А.А. — помощь в написании текста статьи, оформление иллюстраций.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Popov A.V. *The concept of architectural formation of university campuses in Russia : dis. ... Doctor of Architecture*. Nizhny Novgorod, 2022; 622. (rus.).

2. Elyutin V.P. *Higher school of society of developed socialism*. Moscow, Higher School, 1980; 560. (rus.).

3. Logvinovich G.V. Development and features of crisis in higher education of the USSR in the 70–80's of the 20th century. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2018; 3(192):186-193. DOI: 10.23951/1609-624X-2018-3-186-193. EDN THGWUF. (rus.).

4. Gusarova M.N. Historical experience of the formation of engineering and technical intelligentsia in the Soviet higher technical school in the 1950s–1980s. *Scientific Bulletins of Belgorod State University. Series: history. Political science. Economy. Computer Science*. 2010; 1(72):197-204. EDN MUQXVH. (rus.).

5. Lisitsky D.V., Osipov A.G., Kicheev V.G., Savinykh V.N., Makarenko N.N. Dynamics of paradigms of higher education in Russia (late XIX – early XXI centuries). *Novosibirsk State Pedagogical University Bulletin*. 2017; 7(3):157-175. DOI: 10.15293/2226-3365.1703.10. EDN ZFROGR. (rus.).

6. Popov A.V. Architectural Examination of Student Accommodation in Russia and the CIS. *Amazonia Investiga*. 2019; 8(19):179-190. EDN ZGRBIT.

7. Popov A.V., Syrova O.I. Issues of architectural and urban typology of university campuses. *Innovations and Investments*. 2021; 1:157-161. EDN HAGXTU. (rus.).

8. Popov A.V., Syrova O.I. Issues of the typology of open public spaces of university campuses. *Biospheric Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2021; 3(35):116-125. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-35-3-116-125. EDN CZBMNB. (rus.).

9. Popov A.V. *Principles of formation of architecture of student housing of higher educational institutions : dis. ...PhD in Architecture*. Moscow, 2014; 274. (rus.).

10. Volkov S.V. *Intellectual layer in Soviet society*. Moscow, Non-profit organization Foundation “Development”; Institute of Scientific Information for Social Sciences of the Russian Academy of Sciences, 1999; 250. (rus.).

11. Alekseev Yu.V. *Fundamentals of planning, designing settlements in the region and the organization*

and coordination of professional activities : monograph. Moscow, Publishing House DIA, 2022; 296. (rus.).

12. Akhmedova E.A. Postindustrial exit — architecture of public spaces. *Academia. Architecture and Construction*. 2019; 1:144-145. EDN IMGSQJ. (rus.).

13. Gelfond A.L. The concept of potential spatial frameworks of historical settlements. *Academia. Architecture and Construction*. 2019; 1:26-34. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-1-26-34. EDN PBVNPJ. (rus.).

14. Gelfond A.L. Typological aspects of dematerialization of the architectural environment. *Modern architecture of the world: the main processes and directions of development : abstracts of the XIII International Scientific Conference*. 2022; 6-7. EDN IVGMAU. (rus.).

15. Dutsev M.V. Architectural and artistic treatment of open city spaces (with reference to european cities). *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2012; 4(40):4. EDN PJSVQZ. (rus.).

16. Paley E.S. European university's public space in historical evolution. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2019; 1(65):3. EDN BPKCRS. (rus.).

17. Gelfond A.L. Public building and public space. Dualism of relations. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 2:18-31. EDN UGUXAZ. (rus.).

18. Filchenkov K.S. City transit spaces as a reflection of city conflicts. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2020; 1(53):225-231. EDN RSAHNT. (rus.).

19. Shalbolova U.Z., Yegemberdiyeva S.M., Chikibayeva Z.N. Construction of student dormitories in Kazakhstan — expansion of the university housing infrastructure. *Housing Construction*. 2021; 8:18-26. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-8-18-26. EDN CWCPLK. (rus.).

20. Finogenov A.I., Popov A.V. Concept of planning development of coastal resort settlements under conditions of complex relief. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2019; 10(1):135. DOI: 10.14505/jemt.10.1(33).13

Received February 24, 2023.

Adopted in revised form on September 11, 2023.

Approved for publication on September 13, 2023.

B I O N O T E S : **Aleksey V. Popov** — Doctor 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; da945@yandex.ru;

Alexandra A. Semenchukova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; sasha.semenchukova@gmail.com.

Contribution of the authors:

Aleksey V. Popov — writing the text of the article, collecting and processing the material, drawing up a model and a research program.

Alexandra A. Semenchukova — assistance in writing the text of the article, design of illustrations.

The authors declare no conflict of interest.

Торговый дом купца А.С. Колмакова в г. Тюмени. Опыт комплексных исследований, реставрации и приспособления объекта

Александр Иванович Клименко, Мария Юрьевна Гайдук

Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Торговый дом купца А.С. Колмакова — один из объектов культурного наследия (ОКН), формирующий архитектурный облик фрагмента исторического центра г. Тюмени. Рассматриваемый объект служит одним из лучших образцов особого типа общественной городской застройки, так называемого «торгового дома», появление которого является результатом экономического развития города конца XIX – начала XX в. Представлен комплексный анализ, включающий историко-архивные, натурные исследования бывшего торгового дома А.С. Колмакова, входящего в состав обширного усадебного комплекса. Ключевая цель исследования — привести информацию о специфике особого типа общественного здания торгового дома, а именно об объемно-планировочных, конструктивных, архитектурно-художественных особенностях объекта. Рассмотренный пример организации работы с последующей реализацией отвечает на актуальные вопросы сохранения уникальности историко-архитектурной среды в городах, использования и включения ОКН в современную жизнь города. Исследование и популяризация значимых объектов, формирующих архитектурный облик города, — важный и необходимый процесс как для создания разнообразной качественной городской среды, так и просвещения в области отечественной истории и культуры.

Материалы и методы. Изучение ОКН базируется на комплексном подходе, включающем анализ и использование дореволюционных и современных архивных, библиографических источников; сбор и обработку документов, графических и фотоматериалов; результаты натурного обследования (фотофиксация, обмеры); систематизацию научно-исследовательских результатов.

Результаты. Приведены результаты обследования здания, рассмотрены объемно-планировочные, архитектурно-художественные, конструктивные и инженерные особенности объекта.

Выводы. На основе представленного материала коллективом под руководством А.И. Клименко разработаны проекты реставрации и приспособления ОКН дома А.С. Колмакова под новое функциональное назначение для включения объекта в современную жизнь города.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектура, историко-культурное наследие, реставрация, сохранение наследия, купечество, усадьба, торговый дом, Тюмень

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Клименко А.И., Гайдук М.Ю. Торговый дом купца А.С. Колмакова в г. Тюмени. Опыт комплексных исследований, реставрации и приспособления объекта // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1692–1703. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1692-1703

Автор, ответственный за переписку: Мария Юрьевна Гайдук, mary.gaydouk@mail.ru.

Trading house of merchant A.S. Kolmakov in Tyumen. Experience of complex research, restoration and adaptation of the object

Aleksandr I. Klimenko, Maria Yu. Gaydouk

Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article deals with one of the objects of cultural heritage, forming the architectural appearance of a fragment of the historical centre of Tyumen. Kolmakov's house is one of the best examples of a special type of public urban development, the so-called "trading house", the appearance of which is the result of the economic development of the city in the late XIX – early XX centuries. A comprehensive analysis is presented, including historical, archival and field studies of the former trade house of A.S. Kolmakov, which is a part of a vast estate complex. The main purpose of this study is to provide information on the specifics of a special type of public building of a "trading house", namely, about the space-planning, design, architectural and artistic features of the object. The considered example of work organization with subsequent implementation answers the actual issues of preserving the uniqueness of historical and architectural environment in cities, use and inclusion of cultural heritage objects in the modern life of the city. The study and popularization of significant objects that form the architectural image of the city is an important and necessary process both for the creation of a diverse high-quality urban environment and education in the field of national history and culture.

Materials and methods. The study of the object of cultural heritage is based on the complex approach, including the analysis and use of pre-revolutionary and modern archival, bibliographic sources; collection and processing of documents, graphic and photographic materials; results of field survey (photo-fixation, measurements); systematization of research results.

Results. The results of the building survey are given, town-planning, architectural-artistic, constructive and engineering features of the object are considered.

Conclusions. On the basis of the presented material, the team under the direction of A.I. Klimenko developed the projects of restoration and adaptation of the cultural heritage object to include the object in the modern life of the city.

KEYWORDS: architecture, historical and cultural heritage, restoration, heritage preservation, merchants, manor house, trading house, Tyumen

FOR CITATION: Klimenko A.I., Gaydouk M.Yu. Trading house of merchant A.S. Kolmakov in Tyumen. Experience of complex research, restoration and adaptation of the object. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1692-1703. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1692-1703 (rus.).

Corresponding author: Maria Yu. Gaydouk, mary.gaydouk@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Тюмень — один из немногих исторических городов, сохранивший градостроительную структуру и уникальный архитектурный облик, который сложился на рубеже XIX–XX вв. в период его расцвета. На сегодняшний день зафиксировано более 200 объектов культурного наследия (ОКН) регионального и местного значения, охраняемых государством [1]. В настоящее время вопросы сохранения уникальности историко-архитектурной среды в городах, использование и включение ОКН в современную жизнь города имеют особую актуальность, и Тюмень не исключение. Исследование и популяризация значимых объектов, формирующих архитектурный облик города, представляется важным и необходимым процессом как для создания разнообразной качественной городской среды, так и просвещения в области отечественной истории и культуры, особенно региональной архитектуры [2, 3].

Дом А.С. Колмакова — один из лучших образцов особого типа общественной городской застройки, так называемого «торгового дома», появление которого является результатом экономического развития города конца XIX – начала XX в. Дом служит главным объектом, входящим в состав обширной усадьбы с многочисленными постройками: деревянный склад; складское строение; дощатый навес; одноэтажное каменное торгово-складское здание; двухэтажный каменный флигель, который вкупе с особняком формировал ранее существовавшую фронтальную застройку улиц [4, 5].

Здание фиксирует угол квартала в центральных улицах города — Республики (бывшая — Царская) и Первомайской (бывшая — Голицынская) (рис. 1). Во время строительства в последней трети XIX в. это была окраина города, на которой в этот период формировалась обширная базарная площадь.

Как в начальный период, так и сейчас, объект благодаря крупным размерам и выразительности фасадов является значимым градостроительным акцентом этого фрагмента исторического центра города. Сегодняшнее окружение памятника представлено сохранившимися ОКН и застройкой советского периода 40–70-х гг. и новыми объектами рубежа XX–XXI вв.

К настоящему времени из усадебных построек сохранились лишь флигель и пакгауз, находящиеся в глубине квартала. Фронтальная застройка ул. Первомайской от дома А.С. Колмакова до ул. Ленина, а также по ул. Республики от Первомайской до ул. Дзержинского утрачены, у центрального гастронома сформировалась открытая площадь. В силу этого памятник оказался обособленным объектом в застройке квартала, воспринимаемым со всех сторон. Это, безусловно, повысило его градостроительную значимость, но негативно сказалось на архитектурно-художественном восприятии памятника, построенного традиционно с различным отношением к оформлению уличных и дворовых фасадов. Южный и западный торцы здания в уровне первого этажа со следами примыкания утраченных строений, не рассчитанные на обозрение, сегодня составляют «интерьер» центральных улиц.

Среди материалов, позволивших установить первоначальный облик и планировку здания, а также застройку усадьбы и фрагмента квартала представляют интерес графические изображения — это виды здания и застройки на фотографиях 1901, 1909, 1912 гг., советского периода, а также довольно обширная подборка поэтажных планов здания и отдельных объектов усадьбы, полученная в архиве Тюменского филиала ФГУП «Ростехинвентаризация», наиболее ранние из которых датированы 1928 г. [6].



Рис. 1. Вид на дом с пересечения ул. Республики – Первомайская (фотография М.Ю. Гайдук, 2020 г.)

Fig. 1. View of the house from the intersection of Respublika – Pervomayskaya str. (photo by M.Yu. Gaiduk, 2020)

Ретроспектива видов здания и планов этажей отражает изменения, происходившие с ним уже в первые десятилетия существования. Тем не менее можно утверждать, что к началу 30-х гг. XX столетия здание использовалось по своему первоначальному назначению как торговое заведение и в целом сохранило практически без изменений планировочную структуру. Основные изменения и утраты произошли во второй половине XX в., начало которым положило приспособление здания под военный госпиталь во время Второй мировой войны. Как лечебное заведение оно использовалось вплоть до наших дней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По результатам анализа картографических материалов представляется возможным сделать следующие выводы. На рубеже XIX–XX вв. здание представляло собой довольно распространенный тип торгового дома, объемно-планировочная структура которого состояла из основного объема и блока входной группы, ориентированной на ул. Царскую, с парадной лестницей. На первом этаже Г-образно располагался блок из четырех крупных, почти квадратных в плане, торговых залов, анфиладно связанных между собой большими арочными проемами. Каждый зал имел парадный вход с улицы, угловой зал, два входа с улиц Царской и Голицынской. Со стороны двора к залам примыкали два крупных складских помещения и блок рабочей лестницы. Второй этаж занимали конторские и жилые комнаты, соединенные широким Г-образным коридором во внутренней части. Ряд крупных помещений, выходящих окнами на улицы Царскую и Голицынскую, помимо выходов в общий коридор, были анфиладно связаны между собой высокими двухстворчатыми дверями. С западной стороны между выступами лестничных блоков размещался балкон, как указано в экспликации к архивным планам, на железных столбах. Весь подвальный этаж был отведен под складские помещения. Особо интересным является решение по организации загрузки

товаров в подвальные помещения: часть помещений в западной части загружались со двора по лестнице, расположенной под балконом; большие помещения, расположенные под торговыми залами, загружались соответственно с улиц Царской и Голицынской через крупные арочные проемы с железными воротами, находящимися под каждым из уличных входов в торговые залы; для спуска в подвал служили лестницы, устроенные вдоль фасадов и огражденные подпорными стенками. На одном из наиболее ранних изображений застройки отчетливо видно, что здание расположено на высоком, ступенчатом подиуме, занимающем почти весь тротуар по улицам Царской и Голицынской, и в нем устроены небольшие загрузочные входы, ведущие в подземные галереи вдоль цокольных стен (рис. 2).

Позднее, вероятно, потому что широкий подиум затруднял движение пешеходов на перекрестке улиц, он был демонтирован и у каждого из уличных входов в торговые залы были устроены отдельные крыльца, но загрузочные лестницы и галереи под крыльцами сохранились, навесы над ними указаны на плане первого этажа за 1928 г. (рис. 3).

Приспособление здания под госпиталь в годы войны и использование его в последующие многие десятилетия как лечебного заведения требовали наличия большого числа кабинетов, вспомогательных помещений, дополнительных лестниц для посетителей и пр. В результате в одном из бывших торговых залов разместилась регистратура и устроена вновь железобетонная лестница, ведущая в подвал, где находились гардероб и процедурные кабинеты. Торговые залы первого и крупные комнаты второго этажей были поделены перегородками на ряд кабинетов, а также заложены прежние и пробиты вновь новые проемы в кирпичных стенах. При этом следует отметить, что новые перегородки второго этажа располагались в пределах капитальных стен и ранее существовавших массивных деревянных перегородок вдоль коридора. Новые дверные проемы из кабинетов в коридор заполнялись старыми дверными полотнами, снятыми из внутренних проемов, ранее

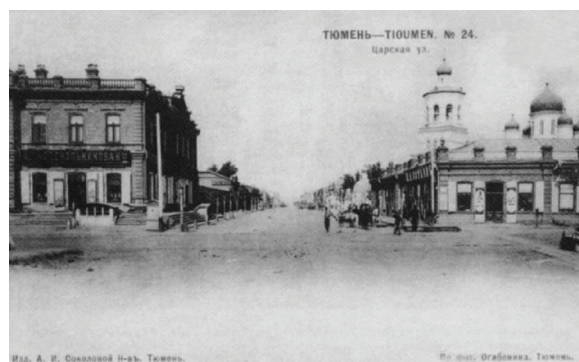


Рис. 2. Вид особняка по ул. Царской (ныне — ул. Республики), фотография 1901 г.

Fig. 2. View of the mansion on Tsarskaya str. (now — Respublika st.), photo taken in 1901



Рис. 3. Вид особняка по ул. Галицынской (ныне — ул. Первомайская), фотография 1912 г.

Fig. 3. View of the mansion on Galitsynskaya st. (now — Pervomayskaya st.), photo taken in 1912

существовавшей анфилады комнат. В этот период был утрачен балкон, засыпаны загрузочные галереи с лестницами в подвальный этаж, проемы частью заложены или переделаны в окна. За более чем полувековую историю в качестве лечебного учреждения здание было модернизировано — демонтированы печи, подведены инженерные сети отопления, водопровода, канализации, неоднократно проводились ремонты. Все вышеперечисленное наложило негативный отпечаток утрат и на конструктивные особенности дома, и на его далеко не рядовые интерьеры.

На генеральном плане 1928 г. помимо главного строения (А) отмечены следующие постройки усадебного комплекса:

- Б — по ул. Царской (ныне — ул. Республики) на расстоянии от особняка линию застройки формировал протяженный деревянный склад, соединенный с домом деревянным навесом;
- Г — по западной границе располагалось крупное, вытянутое в плане каменное складское строение пакгауз;

• Д — между ним и пакгаузом по южной меже усадьбы находился дощатый навес на деревянных столбах;

• Е — по ул. Голицынской (ныне — ул. Первомайская) к особняку примыкал забор с воротами, далее по линии застройки располагалось одноэтажное каменное торгово-складское здание;

• З — в середине усадьбы находился двухэтажный каменный флигель (рис. 4).

К настоящему времени из всего обширного комплекса сохранились главное здание, флигель и пакгауз, однако следы строений, примыкавших к особняку, сохранились на южном и западном фасадах здания. Представленный в данной работе картографический материал является достаточно значимым для выполнения графической реконструкции первоначального облика дома А.С. Колмакова. Следует отметить, что большинство предварительных предположений нашли полное подтверждение при натурных исследованиях объекта посредством шурфов и зондажей.

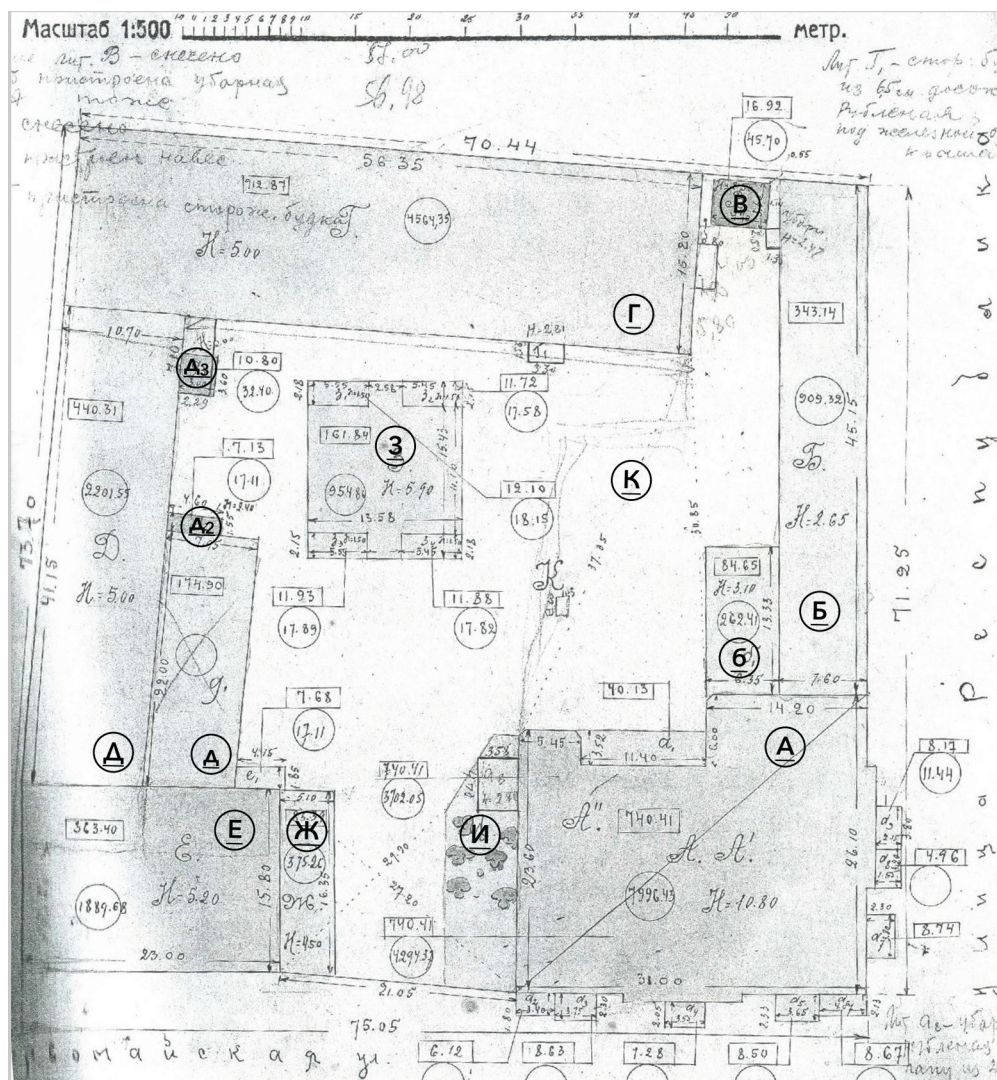


Рис. 4. Генеральный план подвального участка, чертеж 1928 г., архив ТФ ФГУП «Ростехинвентаризация»

Fig. 4. Master plan of the backyard plot, 1928, archive of the Federal State Unitary Enterprise “Rostekhinventarizatsiya”

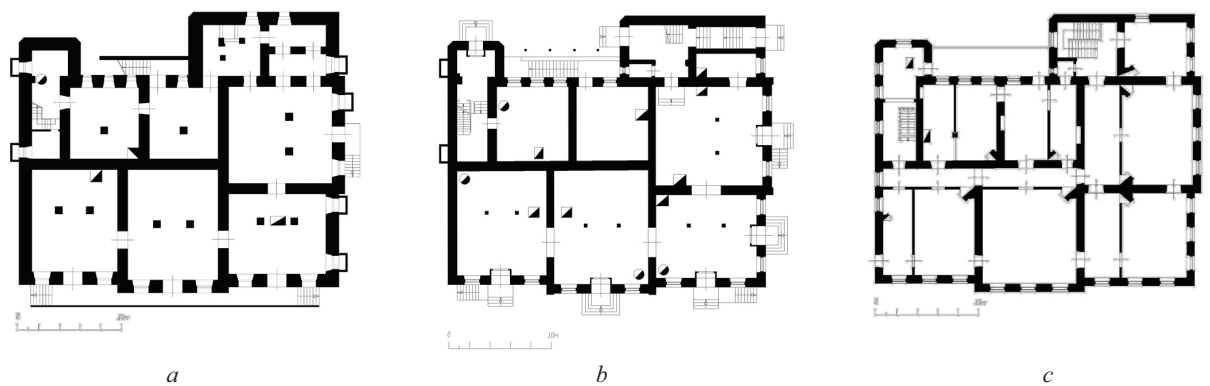


Рис. 5. Графическая реконструкция на 1910 г.: *a* — план подвала; *b* — план первого этажа; *c* — план второго этажа (руководитель А.И. Клименко, 2002 г.)

Fig. 5. Graphic reconstruction for 1910: *a* — basement plan; *b* — first floor plan; *c* — second floor plan (architect: A.I. Klimenko, 2002)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Натурные исследования объекта проводились в два этапа. На первом этапе в 2002 г. по заказу Инспекции по охране и использованию памятников истории и культуры г. Тюмени авторским коллективом под руководством архитектора А. Клименко был выполнен проект реставрации памятника, в составе которого проводились комплексные исследования фасадов, включая обмеры, фотофиксацию и инженерное обследование.

Объемно-планировочная структура памятника проста и характерна для времени постройки, типологии и положения его в застройке квартала — крупный, прямоугольный в плане объем с небольшими, выступающими в сторону двора объемами парадной и рабочей лестниц, между которыми располагался балкон, утраченный и подлежащий восстановлению.

Планировка здания в целом сохранила свою общую схему в пределах капитальных стен и первоначальных перегородок (рис. 5). Натурными исследованиями выявлены и зафиксированы изменения, в основном коснувшиеся закладки прежних и про-



Рис. 6. Натурное обследование объекта (фотографии А.И. Клименко, 2006 г.)

Fig. 6. Field survey of the object (photo by A.I. Klimenko, 2006)



Рис. 7. Конструкция пола первого этажа (фотографии А.И. Клименко, 2002 г.)

Fig. 7. Construction of the first floor (photo by A.I. Klimenko, 2002)

бивки новых проемов в кирпичных стенах, а таких было много. Причем «корректировка» проемов началась уже в процессе строительства здания. Постоянно менялось внутреннее обустройство здания, в том числе печи и камины.

Начало второму этапу исследований положили работы по санации стен цоколя в 2006 г., для этого по периметру наружных стен всего здания были вырыты шурфы. В результате обнаружены все элементы ранее существовавших грузочных галерей вдоль фасадов: каменные проступи лестниц, части подпорных стен, балки перекрытий в виде железных рельс, железные кованые ворота в центральном проеме стены по ул. Первомайской. Во время шурфовки по дворовым фасадам найдена железная пята с восьмигранным стаканом под основание колонны ранее существовавшего балкона (рис. 6).

В процессе проведения натурных исследований выявлены и зафиксированы интересные особенности конструкций и инженерного оборудования здания.

Перекрытие подвального этажа устроено традиционно — кирпичные цилиндрические своды по железным балкам. Особый интерес вызывает конструкция междуэтажного перекрытия двух самых крупных торговых залов. Перекрытие большого пролета осуществлялось посредством системы двойных предварительно напряженных балок. Стабилизацию от прогиба обеспечивали фиксирующие сдвиг специальные шпонки, обернутые жестью для исключения смятия древесины. Дополнительные поперечные балки меньшего сечения удерживали основные от сдвига в горизонтальном направлении, тем самым создавалась общая жесткая конструкция перекрытия зала. На черепные бруски, прибитые к нижнему бревну, укладывались плахи настила. Для обеспечения пожарной безопасности деревянного перекрытия по настилу и вокруг выступающей части каждой балки была уложена кирпичная кладка на глиняном растворе. Поверх кирпичной кладки собрана жесткая решетка из тесаного бруса, скрепленная в «ласточкин хвост». На ячейки решетки укладывались дощатые щиты «черного» пола, собранные по принципу филенки, поверх щитов выполнялся чистый пол из паркета (рис. 7). Вентиляция этого многослойного перекрытия осуществлялась

через систему многоканальных дощатых коробов, стыкуемых между собой через специальные пазы.

Чердачное перекрытие, как и междуэтажное, выполнено из тесаных бревен сечением 420–450 мм (из древесины возрастом 100 и более лет) с вырубленными полками, на которые укладывались тесаные плахи настила толщиной 80–100 мм. При вскрытии чердачного перекрытия были обнаружены дополнительные балки, к которым крепился каркас первоначальных деревянных перегородок. В качестве металлических конструкций повсеместно использовались рельсы для перемычек проемов, балок перекрытий, оснований для печей и косоуров лестниц.

Стропильная система крыши характерна для многих подобных построек этого времени, отмечены многочисленные следы ремонта и усиления конструкций.

Особая система воздухопроводов в кирпичных стенах обеспечивала при печном отоплении циркуляцию теплого воздуха. Воздуховоды выполнены в виде жестяных прямоугольных труб, закладываемых в стены, такие системы зафиксированы при вскрытии поздних проемов (рис. 8).

Представляется важным отметить архитектурно-художественные особенности внешнего облика объекта. Крупный двухэтажный особняк под вальмовой крышей обладает очень выразительными в архитектурном отношении нештукатуренными, краснокирпичными фасадами [7]. Традиционно основное внимание было уделено проработке уличных фасадов, в данном случае угловое положение здания



Рис. 8. Конструкция печного отопления в стене и в полу (фотографии А.И. Клименко, 2002 г.)

Fig. 8. Construction of stove heating in the wall and in the floor (photo by A.I. Klimenko, 2002)



a



b

Рис. 9. Графическая реконструкция на рубеж 1910 г., ООО «Тюменьпроект» (руководитель А.И. Клименко, 2002 г.): *a* — восточный фасад по ул. Голицынской; *b* — северный фасад по ул. Царской

Fig. 9. Graphic reconstruction at the turn of 1910, “Tyumenproekt” (architect A.I. Klimenko, 2002): *a* — eastern facade along Golitsinskaya st.; *b* — northern facade along Tsarskaya st.

в квартале обусловило появление двух «главных» фасадов по улицам Царской и Голицынской (ныне — ул. Республики и Первомайская). Набор архитектурных элементов и деталей идентичен для обоих фасадов, но их композиция несколько различна.

Восточный фасад по ул. Первомайской (бывшая — Голицынская) имеет классицистическую, абсолютно симметричную, трехчастную композицию. Фасадная плоскость разделена на три почти равные части, по три оси проемов в каждой. Центральная часть выделена ризалитом, и центр композиции акцентирован аттиком оригинального, редко встречающегося очертания. Центральная часть аттика с полуциркульным окном завершена карнизом в виде двух вогнутых относительно оси симметрии линий, вершина которых увенчана своеобразной башенкой. Углы ризалита и основного объема оформлены рустом, различным в уровнях первого и второго этажей. В центральных проемах каждой из трех частей фасада устроены входы в торговые залы первого этажа с крыльцами.

Все проемы первого этажа были оборудованы коваными железными ставнями, от которых до наших дней сохранились только завесы в кирпичной кладке

откосов. Высокие окна лучкового завершения украшены ступенчатыми сандриками по первому этажу и наличниками с элементами интерпретированного ордера по второму. Сандрики наличников второго этажа выполнены в виде прямого профильного карниза, поддержанного кронштейнами, с оригинальным картушем в центре. В подоконной части наличники второго этажа объединены профильным пояском.

По этажам фасадная плоскость разделена междуэтажным карнизом с «сухариками». Венчает здание плоский карниз большого выноса, укрепленный металлическими пластинами, и широкий фриз с ритмом кронштейнов и «свесов». По кровле устроен традиционный для кирпичных зданий того времени парапет из аттиковых столбиков по осям пилястр и простенков, и деревянного ограждения с балясинами.

Северный фасад по ул. Республики (бывшая — Царская) решен в аналогичных формах с различием в том, что симметрия трехчастного построения с ризалитом и аттиком в центре нарушена укороченной правой частью в две оконные оси, в уровне первого этажа которой устроен парадный вход с крыльцом. Проем входа с полуциркульным завершением выде-



Рис. 10. Фрагмент интерьера первого этажа (фотографии А.И. Клименко, 2002 и 2011 гг.)

Fig. 10. Fragment of the first floor interior (photo by A.I. Klimenko, 2002 and 2011)

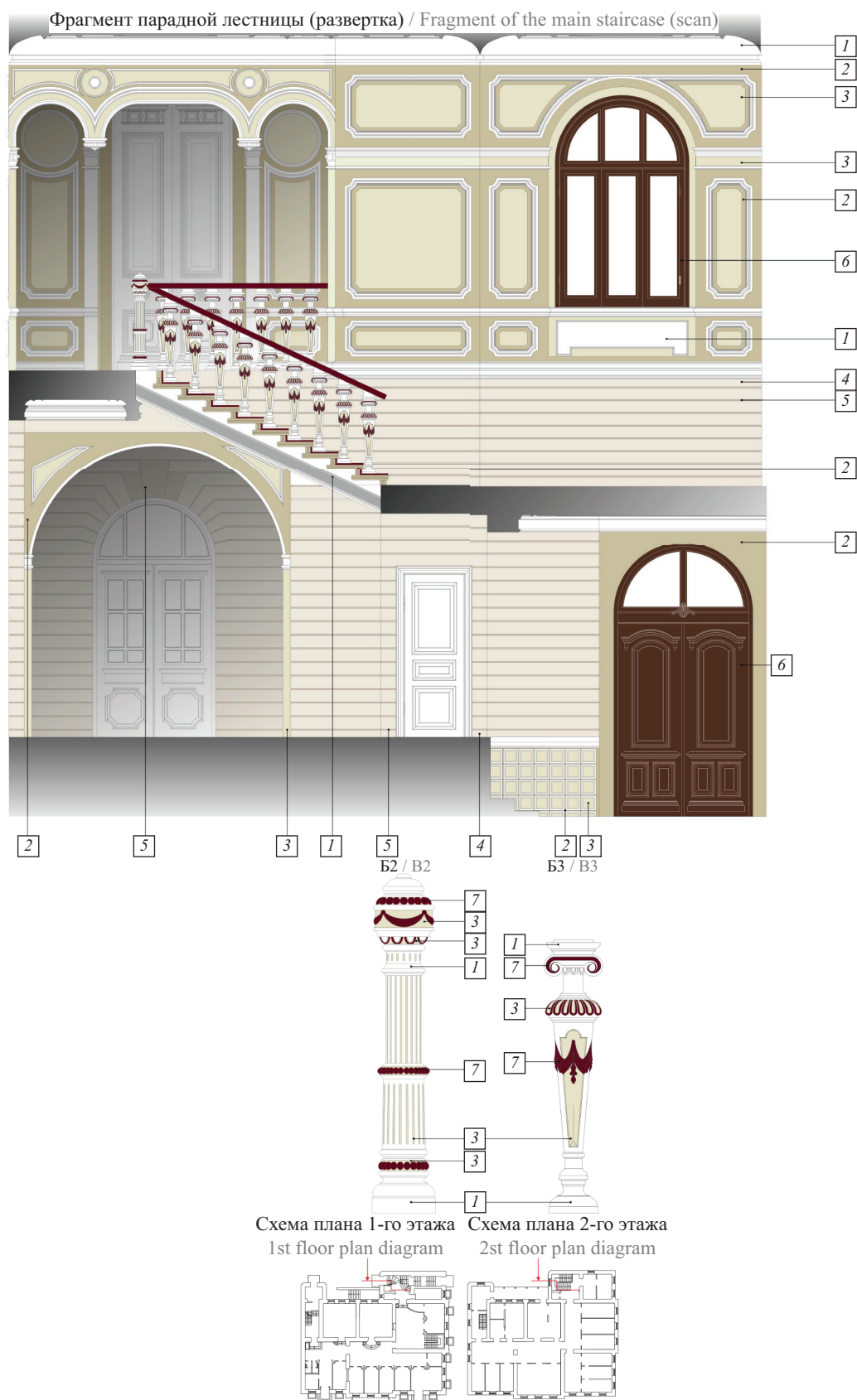


Рис. 11. Фрагмент интерьера, архитектор А.И. Клименко, 2007 г.

Fig. 11. Interior fragment, architect A.I. Klimenko, 2007



Рис. 12. Фрагмент интерьера второго этажа в процессе реализации (фотографии А.И. Клименко, 2011 г.)

Fig. 12. Fragment of the second floor interior in the process of implementation (photo by A.I. Klimenko, 2011)



лен арочным обрамлением с трилистником «замкового» камня и более крупным сандриком, аналогичным остальным проемам первого этажа.

Торцевые фасады здания, к которым ранее примыкали строения, как и дворовый, почти лишены декора, за исключением венчающего и междуэтажного карнизов. В завершении западного торца, который просматривался с ул. Царской, выполнено ограждение, аналогичное главным фасадам. Единственным архитектурным элементом, украшавшим дворовый фасад, был балкон на железных столбах с ограждением из баясин.

Результаты комплекса натурных исследований вкпе с материалами историко-архивных и библиографических исследований позволили выполнить графическую реконструкцию внешнего облика памятника на рубеж 1910 г., что в дальнейшем было использовано при разработке проекта реставрации и приспособления ОКН дома А.С. Колмакова (рис. 9) [8–21].

Интерьеры помещений подвального этажа, использовавшиеся в сугубо утилитарных целях для складирования товаров, изначально лишены какого-либо декора. Некоторое разнообразие внутреннему пространству придавали лишь лучковые проемы и цилиндрические своды перекрытий. Главное внимание было уделено декоративному убранству интерьеров вестибюля с парадной лестницей, торговым залам первого и помещениям второго этажей. В целом богатое декоративное убранство интерьеров отражает характерные, эклектичные черты времени строительства объекта, вместе с тем лишены «купеческой вычурности» и выдержаны в достаточно строгой классицистической манере.

Наряду с общими, характерными чертами своего времени, есть ряд особенностей в организации и оформлении внутренних пространств, которые заслуженно выдвигают дом А.С. Колмакова в разряд одного из интереснейших особняков Тюмени конца XIX в. Особый интерес в этом плане представляют интерьеры торговых залов первого этажа. Мощная система из деревянных балок обеспечивала перекрытие пролетов залов в 8–9 м без допол-

нительных промежуточных опор. Однако именно для создания особенного интерьера для посетителей в каждом из торговых залов было установлено по паре деревянных, декорированных колонн с капителями и базами, на которые опирались выполненные из досок пустотелые декоративные балки. Таким образом, создавалась своеобразная решетчатая конструкция потолка по типу «кессонного», по краям балки были закруглены, имитируя арки, а в местах примыкания к стенам они опирались на деревянные капители-кронштейны, аналогичные капителям колонн (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Архитектурной группой под руководством А.И. Клименко на основе комплексных научных исследований, разработанных разделов рабочей проектной документации для реставрации выполнен с последующей реализацией проект приспособления ОКН дома А.С. Колмакова под кафедру стоматологии Тюменской государственной медицинской академии и стоматологическую поликлинику. В рамках этой работы с октября 2006 по май 2007 г. был выполнен комплекс исследований объекта, его планировочной структуры, конструкций, интерьеров с проведением зондажей, обмеров и фотофиксации (рис. 11, 12). Исследования начались, когда здание освободили от пользователей, и оно еще сохранило все поздние наслоения. С начала 2007 г. строительная организация приступила к выполнению подготовительных работ, расчистке здания от оборудования, демонтажу поздних перегородок, вскрытию конструкций полов и перекрытий.

Данный пример работы с объектом культурного наследия, представленный на всех этапах, это довольно редкий благоприятный случай, предоставивший исследователям возможность полного и детального обследования всех элементов памятника, что в свою очередь позволило выявить и зафиксировать все изменения в объекте, начиная с его строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гайдук М.Ю. Архитектурное наследие тюменского купечества // Наследие и современность. 2021. Т. 4. № 2. С. 216–232. DOI: 10.52883/2619-0214-2021-4-2-216-232. EDN MJHTBM.
2. Пруцын О.И. Реставрация памятников архитектуры в городе // Градостроительные вопросы сохранения и использования памятников архитектуры. Союз архитекторов СССР / науч. ред. В.А. Лавров. М., 1980. С. 73–79.
3. Ситникова Е.В. Проблемы сохранения исторической застройки в современном городе (на примере г. Томска) // Реконструкция и реставрация архитектурного наследия : мат. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2020. С. 138–143. EDN IEYXEV.
4. Подъяпольский С.С., Бессонов Г.Б., Беляев Л.А., Коркин В.Д., Постникова Т.М., Табунчиков Ю.А. Реставрация памятников архитектуры : учебное пособие / под общ. ред. С.С. Подъяпольского. М. : Стройиздат, 2000. 288 с.
5. Клименко А.И., Гайдук М.Ю. Типология застройки сибирских городов рубежа XIX–XX вв. На примере объектов, построенных на средства купеческой семьи Колмаковых // Архитектура : сб. науч. тр. 2019. С. 133–139. EDN PHVRJQ.
6. Копылов В.Е. Былое Светописи. У истоков фотографии в Тобольской губернии. Тюмень : Слово, 2004. 863 с.
7. Козлова-Афанасьева Е.М. Архитектурное наследие Тюменской области : иллюстрированный научно-практический каталог. Тюмень : Искусство, 2008. 488 с. EDN QNOEBV.
8. Клименко А.И., Гайдук М.Ю. Каменные торговые здания в сельских поселениях Тобольской губернии второй половины XIX – начала XX века // Архитектон: известия вузов. 2022. № 3 (79). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-1. EDN SNQFRC.
9. Клименко А.И., Шульгин П.М. Потенциал культурного наследия Тюменской области: официальные оценки и реальное состояние // Наследие и современность. 2021. Т. 4. № 1. С. 68–92. EDN YNCQFY.
10. Бойко В.П., Ситникова Е.В., Богданова О.В., Шагов Н.В. Формирование архитектурного облика городов Западной Сибири в XVII – начале XX в. и местное купечество (Тобольск, Тюмень, Томск, Тара, Омск, Каинск). Томск : Изд-во ТГАСУ, 2017. 323 с.
11. Клименко А.И., Гайдук М.Ю. Стилиевые направления в архитектурном наследии региона : учебное пособие. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2022. 93 с.
12. Гайдук М.Ю. Роль застройки, возведенной на средства купечества, в сохранении исторического облика г. Тюмени // Перспективы развития фундаментальных наук : сб. науч. тр. XVIII Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2021. С. 110–112. EDN MPDJBQ.
13. Клименко А.И., Клюкин А.А. Классификация современных приемов реконструкции и регенерации объектов исторического и культурного наследия // Архитектура и архитектурная среда: вопросы исторического и современного развития-2019 : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 94–98. EDN CWMIDX.
14. Михайловский Е.В. Реставрация памятников архитектуры. Развитие теоретических концепций. М. : Стройиздат, 1971. 190 с.
15. Горбачёв В.Т., Крадин Н.Н., Крадин Н.П., Крушинский В.И., Царёв В.И., Степанская Т.М. Градостроительство Сибири. СПб. : Коло, 2011. 784 с. EDN QNPMUX.
16. Копылов В.Е. Окрик памяти. Книга первая. Тюмень : Слово, 2000. 336 с.
17. Копылов В.Е. Окрик памяти. Книга вторая. Тюмень : Слово, 2001. 352 с.
18. Гутнов А.Э., Глазычев В.Л. Мир архитектуры: лицо города. М. : Мол. гвардия, 1990. 350 с.
19. Заварихин С.П., Жученко Б.А. Архитектура Тюмени. Тюмень : Радуга-Т, 2004. 296 с.
20. Кедринский А.А. Основы реставрации памятников архитектуры. Обобщение опыта школы ленинградских реставраторов : учебное пособие. М. : Изобраз. искусство, 1999. 182 с.
21. Пруцын О.И., Рымашевский Б., Бурсевич В. Архитектурно-историческая среда. М. : Стройиздат, 1990. 408 с.

Поступила в редакцию 2 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 2 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Иванович Клименко — доцент, заведующий кафедрой дизайна архитектурной среды, Институт архитектуры и дизайна; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 781366, Scopus: 57365838800, ORCID: 0000-0001-7670-9057; archklim@mail.ru;

Мария Юрьевна Гайдук — кандидат архитектуры, доцент кафедры дизайна архитектурной среды, заместитель директора по науке и инновациям, Институт архитектуры и дизайна; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 927342, Scopus: 57220812453, ResearcherID: HJB-0256-2022, ORCID: 0000-0003-1350-2504; mary.gaydouk@mail.ru.

Вклад авторов:

Клименко А.И. — научное руководство, руководитель натурных исследований проекта реставрации и приспособления объекта.

Гайдук М.Ю. — концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gaiduk M. Architectural heritage of Tyumen merchants. *Heritage and Modern Times*. 2021; 4(2):216-232. DOI: 10.52883/2619-0214-2021-4-2-216-232. EDN MJHTBM. (rus.).
2. Prutsyn O.I. Restoration of architectural monuments in the city. *Urban planning issues of preservation and use of architectural monuments. Union of Architects of the USSR* / scientific ed. V.A. Lavrov. Moscow, 1980; 73-79. (rus.).
3. Sitnikova E.V. Problems of preserving the historical building in a modern city (for example, Tomsk). *Reconstruction and restoration of architectural heritage : proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Saint Petersburg, 2020; 138-143. EDN IEYXEV. (rus.).
4. Podyapolsky S.S., Bessonov G.B., Belyaev L.A., Korkin V.D., Postnikova T.M., Tabunshchikov Yu.A. *Restoration of architectural monuments : textbook*. Moscow, Stroyizdat, 2000; 288. (rus.).
5. Klimenko A.I., Gaiduk M.Yu. Typology of building development in Siberian cities at the turn of the 19th – 20th centuries. On the example of objects built at the expense of the merchant family Kolmakov. *Architecture : collection of scientific papers*. 2019; 133-139. EDN PHVRJQ. (rus.).
6. Kopylov V.E. *Past light paintings. At the origins of photography in the Tobolsk province*. Tyumen, Slovo, 2004; 864. (rus.).
7. Kozlova-Afanas'eva E.M. *Architectural heritage of the Tyumen region : an illustrated scientific and practical catalog*. Tyumen, Art Publ., 2008; 488. EDN QNOEBV. (rus.).
8. Klimenko A.I., Gaiduk M.Yu. Commercial stone buildings in Tobolsk province villages in the second half of the 19th – early 20th century. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022; 3(79). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-1. EDN SNQFRC. (rus.).
9. Klimenko A., Shulgin P. Tyumen region cultural heritage potential: official assessments and real situation. *Heritage and Modern Times*. 2021; 4(1):68-92. EDN YNCQFY. (rus.).
10. Boiko V.P., Sitnikova E.V., Bogdanova O.V., Shagov N.V. *Formation of the architectural appearance of the cities of Western Siberia in the 17th – early 20th century and local merchants (Tobolsk, Tyumen, Tomsk, Tara, Omsk, Kainsk)*. Tomsk, TGASU Publ., 2017; 324. (rus.).
11. Klimenko A.I., Gaiduk M.Yu. *Style directions in the architectural heritage of the region : textbook*. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 2022; 93. (rus.).
12. Gaydouk M.Y. The role of development sponsored by merchants for the saving historical image of the Tyumen. *Prospects for the development of fundamental sciences : collection of scientific papers of the XVIII International Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists*. 2021; 110-112. EDN MPDJBQ. (rus.).
13. Klimenko A.I., Klukin A.A. Classification of modern methods of reconstruction and regeneration of objects of historical and cultural heritage. *Architecture and architectural environment: issues of historical and modern development-2019 : proceedings of the international scientific and practical conference*. 2019; 94-98. EDN CWMIDX. (rus.).
14. Mikhaylovskiy E.V. *Restoration of architectural monuments. Development of theoretical concepts*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971; 190. (rus.).
15. Gorbachev V.T., Kradin N.N., Kradin N.P., Krushlinsky V.I., Tsarev V.I., Stepankaya T.M. *Urban planning of Siberia*. Saint Petersburg, Kolo Publ., 2011; 784. EDN QNPMUX. (rus.).
16. Kopylov V.E. *Shout of memory. Book One*. Tyumen, Slovo Publ., 2000; 336. (rus.).
17. Kopylov V.E. *Shout of memory. Book Second*. Tyumen, Slovo Publ., 2001; 352. (rus.).
18. Gutnov A.E., Glazychev V.L. *The world of architecture: the face of the city*. Moscow, Molodaya gvardiya Publ., 1990; 350. (rus.).
19. Zavarikhin S.P., Zhuchenko B.A. *Architecture of Tyumen*. Tyumen, Raduga-T Publ., 2004; 296. (rus.).
20. Kedrinskiy A.A. *Fundamentals of restoration of architectural monuments. Generalization of the experience of the school of Leningrad restorers*. Moscow, Izobraz. Iskusstvo Publ., 1999; 182. (rus.).
21. Prutsyn O.I., Rymashevsky B., Borusevich V. *Architectural and historical environment*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990; 408. (rus.).

Received August 2, 2023.

Adopted in revised form on August 6, 2023.

Approved for publication on September 2, 2023.

B I O N O T E S: **Aleksandr I. Klimenko** — Associate Professor, Head of the Department of Architectural Environment Design, Deputy Director for Science and Innovation, Institute of Architecture and Design; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Valadarski st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 781366, Scopus: 57365838800, ORCID: 0000-0001-7670-9057; archklim@mail.ru;

Maria Yu. Gaydouk — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architectural Environment Design, Deputy Director for Science and Innovation, Institute of Architecture and Design; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Valadarski st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 927342, Scopus: 57220812453, ResearcherID: HJB-0256-2022, ORCID: 0000-0003-1350-2504; mary.gaydouk@mail.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr I. Klimenko — scientific supervisor; head of field research project of restoration and adaptation of the object.

Maria Yu. Gaydouk — concept of the study, revision of the text, final conclusions.

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 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1704-1712

Исследование влияния этажности железобетонных каркасов на деградацию собственных частот и характер разрушения при землетрясении

Олег Вартанович Мкртычев, Роман Александрович Зайцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — изучение влияния деградации частотных параметров железобетонных зданий при действии сейсмической нагрузки и оценка характера разрушения в зависимости от этажности здания с помощью численных экспериментов в программном комплексе LS-DYNA. Для получения собственных частот и форм в определенные моменты времени в задаче, решаемой явной схемой интегрирования, ищется решение с использованием неявной схемы.

Материалы и методы. Рассмотрены пять сооружений разной этажности. В расчетных схемах зданий используется непосредственное армирование несущих элементов. Для моделирования бетона применяется модель материала Continuous Surface Cap Model (CSCM). Данный материал позволяет учитывать накопление повреждений. Моделирование арматуры осуществляется с помощью идеально упругопластической модели Прандтля. Арматура моделировалась стержнями и была непосредственно погружена в бетон. Для этого использовалась лагранжево-эйлерова связь. Расчет производился на жестком основании с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. Сейсмическое воздействие задавалось в виде двухкомпонентных акселерограмм, нормированных на 8 баллов по шкале MSK-64.

Результаты. Получены кривые изменения и деградации собственных частот для каркасов разной этажности, а также кривые накопления повреждений для всего каркаса.

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что при землетрясении интенсивностью 8 баллов имеет место существенное (до 30 %) снижение частот собственных колебаний рассмотренных каркасов. Наибольшее количество повреждений возникает на стадии активной фазы сейсмического воздействия. С увеличением этажности интенсивность деградации собственных частот растет, скорость накопления и объем повреждений возрастают.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деградация свойств, накопление повреждений, снижение собственных частот, характер разрушения, железобетон, сейсмическое воздействие, прямой динамический метод, железобетонный каркас, сейсмостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Зайцев Р.А. Исследование влияния этажности железобетонных каркасов на деградацию собственных частот и характер разрушения при землетрясении // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1704–1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1704-1712

Автор, ответственный за переписку: Роман Александрович Зайцев, yanamid123@gmail.com.

Studies of the influence of the number of storeys of reinforced concrete frames on the degradation of natural frequencies and character of earthquake damage

Oleg V. Mkrtychev, Roman A. Zaitsev

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

ABSTRACT

Introduction. The objectives of this work are to study the influence of degradation of the frequency parameters of reinforced concrete buildings under the action of seismic loading and to evaluate the nature of destruction depending on the number of storeys of the building itself, using numerical experiments in the LS-DYNA software package. To obtain natural frequencies and forms at certain times in a problem solved by an explicit integration scheme, solutions are sought using an implicit scheme.

Materials and methods. Five structures of different storeys are considered. The design schemes of the buildings use direct reinforcement of load-bearing elements. The Continuous Surface Cap Model (CSCM) is used to model the concrete. This material allows the accumulation of damage to be taken into account. The ideal elastic-plastic Prandtl model is used to model reinforcement. The reinforcement was modelled with rods and was directly immersed in concrete. To implement this, the Euler-Lagrange equation was used. The calculation was carried out on a rigid base, taking into account physical, geometric and structural non-linearities. The seismic impact was specified in the form of 2-component accelerograms normalized to 8 points on the MSK-64 scale.

Results. Various results of the study were obtained. Curves of change and degradation of natural frequencies for frames of different number of storeys are obtained. Damage accumulation curves for the entire framework were also obtained.

Conclusions. The analysis of the obtained results shows that during an earthquake with an intensity of 8 points, there is a significant (up to 30 %) reduction of frequencies of natural oscillations of the considered frames. The greatest amount of damage occurs at the stage of active phase of seismic impact. With the increase in the number of storeys, the intensity of degradation of natural frequencies increases, the rate of accumulation and the amount of damage increase.

KEYWORDS: degradation of properties, accumulation of damages, reduction of natural frequencies, nature of destruction, reinforced concrete, seismic impact, direct dynamic method, reinforced concrete frame, seismic resistance

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Zaitsev R.A. Studies of the influence of the number of storeys of reinforced concrete frames on the degradation of natural frequencies and character of earthquake damage. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1704-1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1704-1712 (rus.).

Corresponding author: Roman A. Zaitsev, yanamid123@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

С середины XX в. в нашей стране началось строительство высотных домов, в связи с этим появилось большое количество исследований, посвященных изучению вибрационных процессов в зданиях. В последнее время активно развиваются различные динамические методы обследования зданий и сооружений, которые определяют собственные частоты, помогающие оценить состояние здания или конструкции, обнаружить дефекты в несущих конструкциях [1]. Эти методы построены на натурных экспериментальных исследованиях, в том числе с применением конечных элементов (КЭ) программных комплексов (ПК) [2].

Основным инструментом этих исследований служит модальный анализ. В результате расчетов должны быть получены собственные формы и частоты, обобщенные массы и декременты собственных тонов колебаний, которые являются исходными данными при решении широкого круга задач динамики механических систем.

Цель настоящей статьи — изучение влияния деградации частотных параметров железобетонных зданий при действии сейсмической нагрузки и оценки характера разрушения в зависимости от этажности здания с помощью численных экспериментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе проведения данного исследования использовался конечно-элементный ПК LS-DYNA, в котором реализованы нелинейные динамические методы.

Для решения нелинейных динамических задач целесообразно применять методы, основанные на явной схеме интегрирования уравнений движения системы. Явные методы используют рекуррентные соотношения, выражающие перемещения,

скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предыдущих шагах. В ПК LS-DYNA используется один из явных методов интегрирования, а именно метод центральных разностей. В этом случае применяется выражение с запаздыванием по времени [3]:

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u}_i + Ku_i = f_i^a. \quad (1)$$

В LS-DYNA¹ разработана методика расчета на сейсмические воздействия явными методами с периодическим вычислением собственных значений неявными методами в определенные моменты времени. Такой подход дает возможность оценить техническое состояние зданий и деградацию частотных параметров в процессе землетрясения.

В расчетной схеме зданий используется непосредственное армирование несущих элементов. В LS-DYNA реализована функция¹, которая позволяет учитывать непосредственное армирование бетона арматурой с помощью объемных (для бетона) и стержневых (для арматуры) КЭ [4].

Для моделирования бетона используется модель Continuous Surface Cap Model (CSCM)², применяемая для объемных КЭ. Модель бетона представляет собой сар-модель, т.е. с гладким непрерывным сопряжением между поверхностью разрушения и упрочняющим «колпачком». Общая форма поверхности текучести в пространстве главных напряжений показана на рис. 1. Данная модель материала верифицирована во многих исследованиях [4–8] и использовалась в работах [9–16].

¹ Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA. Keyword user's manual, R11. 2018. Vol. I.

² Evaluation of LS-DYNA Concrete. Material Model 159. US Department of Transportation. Federal Highway Administration. McLean. Publication No. FHWA-HRT-05-063. 2007. 190 p.

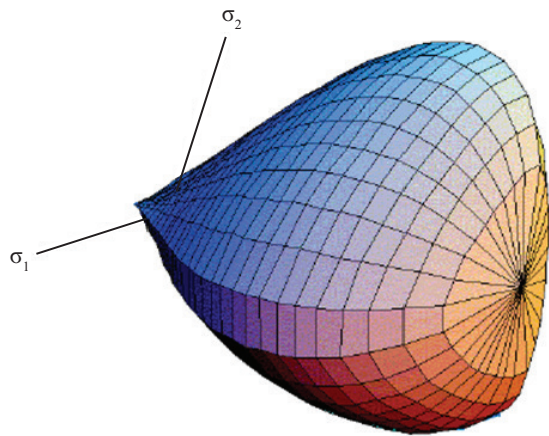


Рис 1. Общая форма поверхности текучести модели бетона в пространстве главных напряжений
Fig. 1. General shape of the flow surface of the concrete model in the main stress space

Предложена формула для функции повреждения³:

$$\sigma_{ij}^d = (1 - d) \sigma_{ij}^{vp}, \tag{2}$$

где d — скалярный параметр повреждения, который преобразует тензор напряжения без повреждения, обозначенный σ^{vp} , в тензор напряжения с повреждением, обозначенный σ^d . Параметр урона d варьируется от нуля (без повреждений) до 1 (полное повреждение).
Для моделирования арматуры применяется идеально упругопластическая модель Прандтля с начальным модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести принят равным $\sigma_{\tau} = 245$ МПа, предельные пластические деформации $\epsilon_{pl} = 0,1$.
Объектами исследования являются однопролетные здания разной этажности (от одного до пяти этажей) рамной конструктивной схемы. На рис. 2 приведена расчетная схема типового эта-

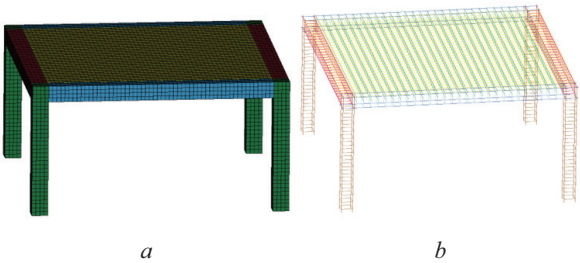


Рис. 2. Расчетная схема типового этажа: a — бетон; b — арматура
Fig. 2. Design scheme of a typical storey: a — concrete; b — reinforcement

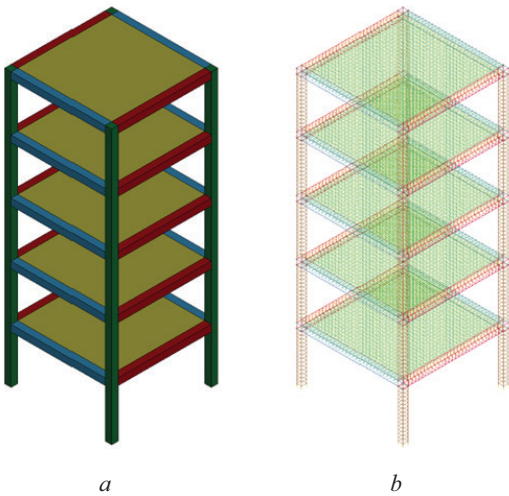


Рис. 3. Расчетная схема пятиэтажного здания: a — бетон; b — арматура
Fig. 3. Design scheme of a five-storey building: a — concrete; b — reinforcement

жа, на рис. 3 — схема пятиэтажного здания. Габаритные размеры типового этажа в плане составляют $6 \times 6 \times 3,3$ (h) м. Перекрытия — балочные монолитные железобетонные. Толщина плит 20 см, ригели и колонны сечением 40×40 см.

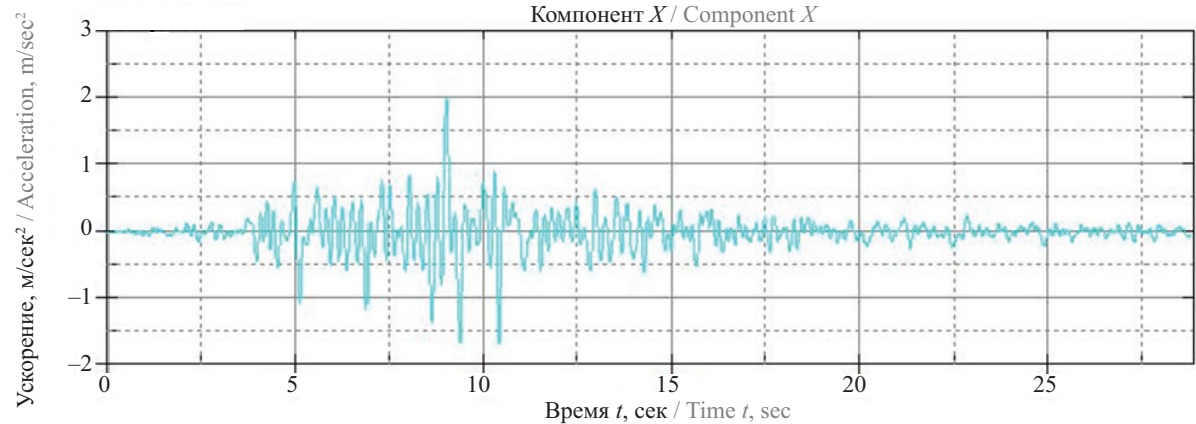


Рис. 4. Акселерограммы (компоненты X и Y), нормированные на 8 баллов
Fig. 4. Accelerograms (components X and Y), normalized by 8 points

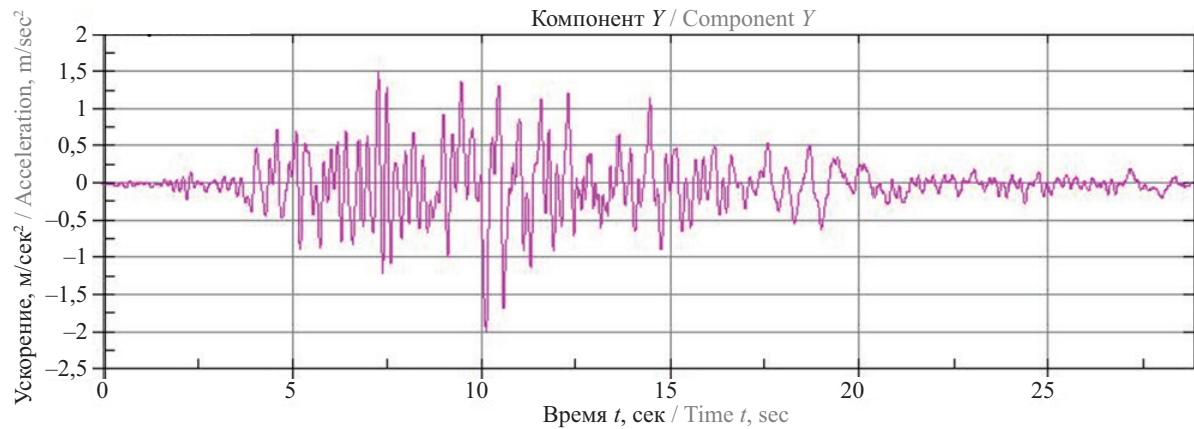


Рис. 4. Акселерограммы (компоненты X и Y), нормированные на 8 баллов (окончание)
Fig. 4. Accelerograms (components X and Y), normalized by 8 points (ending)

Продольная арматура ригелей и колонн $d = 28$ мм, поперечная арматура в колоннах и ригелях $d = 10$ мм. Продольная арматура плиты $d = 10$ мм, поперечная арматура плиты $d = 10$ мм.

Бетон соответствует классу⁴ В45 с пределом прочности на сжатие $f_{cm} = 43$ МПа [17].

Расчет выполнялся на жестком основании с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. Сейсмическое воздействие задавалось в виде двухкомпонентных акселерограмм, нормированных на 8 баллов по шкале MSK-64 [18–20]. Акселерограмма представлена на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5–8 показаны результаты расчета в ПК LS-DYNA. На рис. 7 представлен график первой ча-

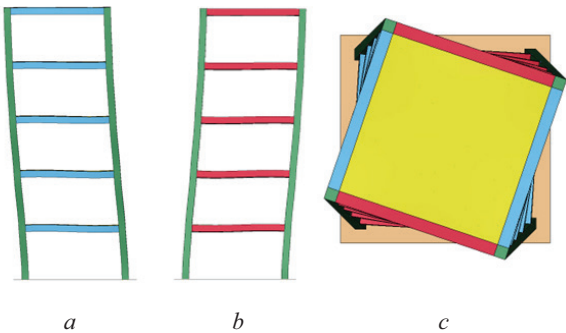


Рис. 5. Формы собственных колебаний пятиэтажного здания: a — 1-я; b — 2-я; c — 3-я (соответствующие частоты: 1,28; 1,62; 2,13 Гц)
Fig. 5. Forms of natural oscillations of a five-storey building: a — 1; b — 2; c — 3 (corresponding frequencies: 1.28; 1.62; 2.13 Hz)

⁴ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

стоты каждого здания форм собственных колебаний в заданные моменты времени, которые определя-

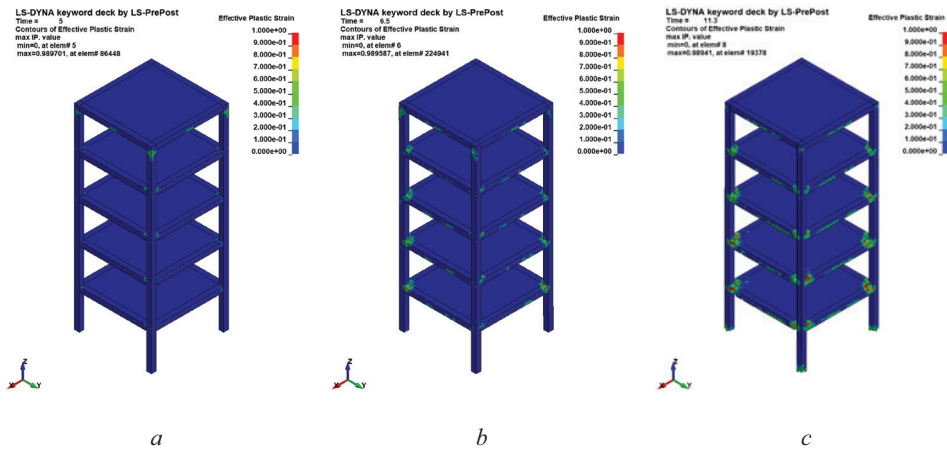


Рис. 6. Накопление повреждений в разные моменты времени (a — 5 с; b — 6,5 с; c — 11,3 с) для пятиэтажного здания (1 на шкале соответствует полному истощению несущей способности элемента)
Fig. 6. Damage accumulation at different points in time (a — 5 s; b — 6.5 s; c — 11.3 s) for a five-storey building (1 on the scale corresponds to complete exhaustion of the bearing capacity of the element)

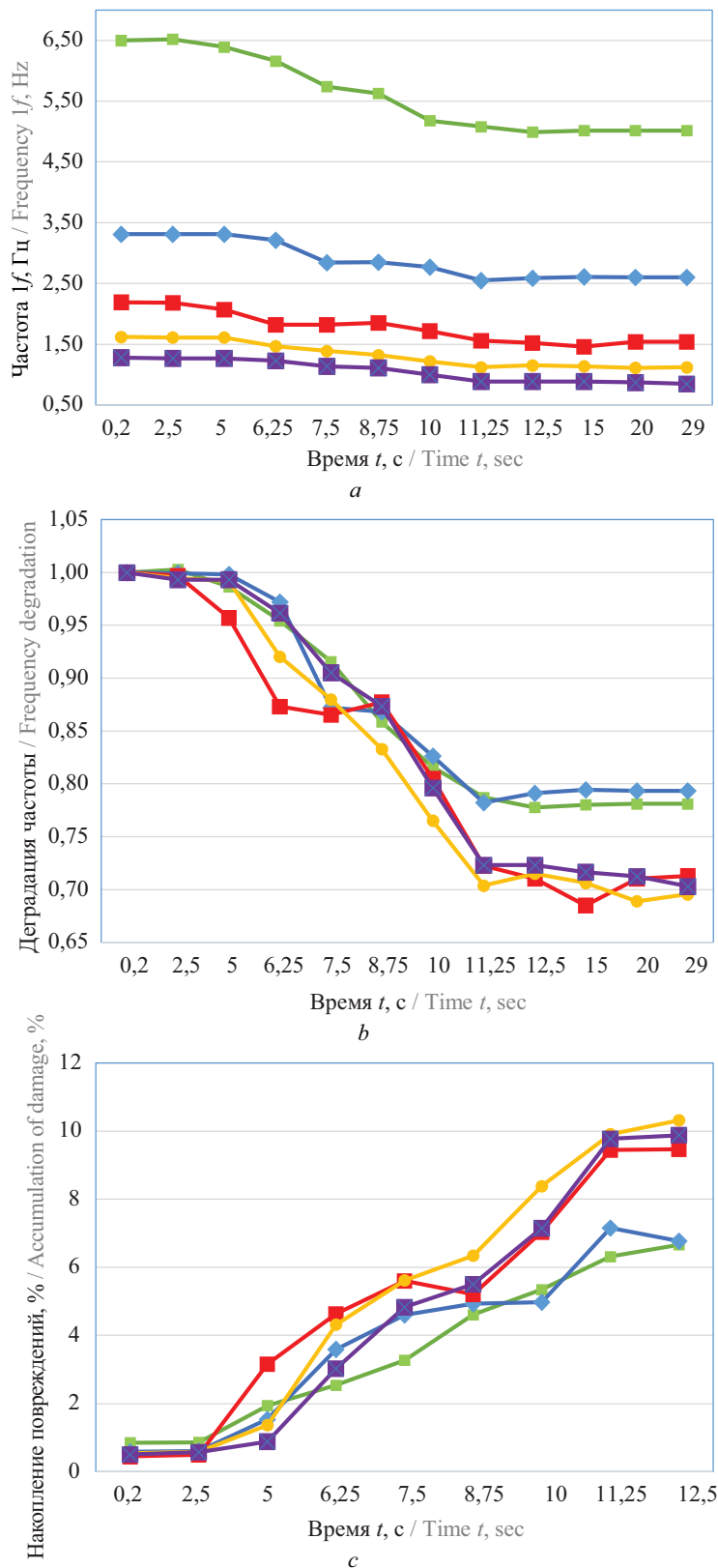


Рис. 7. Графики изменения первой частоты собственных колебаний (а), деградации первой частоты собственных колебаний (b) и накопления повреждений конструкции (с), %, в процессе 8-балльного землетрясения в зависимости от этажности: — одноэтажное здание; — двухэтажное здание; — трехэтажное здание; — четырехэтажное здание; — пятиэтажное здание

Fig. 7. Graphs change of the first frequency of natural oscillations (a), degradation of the first frequency of natural oscillations (b) and accumulation of structural damage (c), %, in the process of an 8-magnitude earthquake, depending on the number of storeys: — one story building; — two storey building; — three-storey building; — four-storey building; — five-storey building

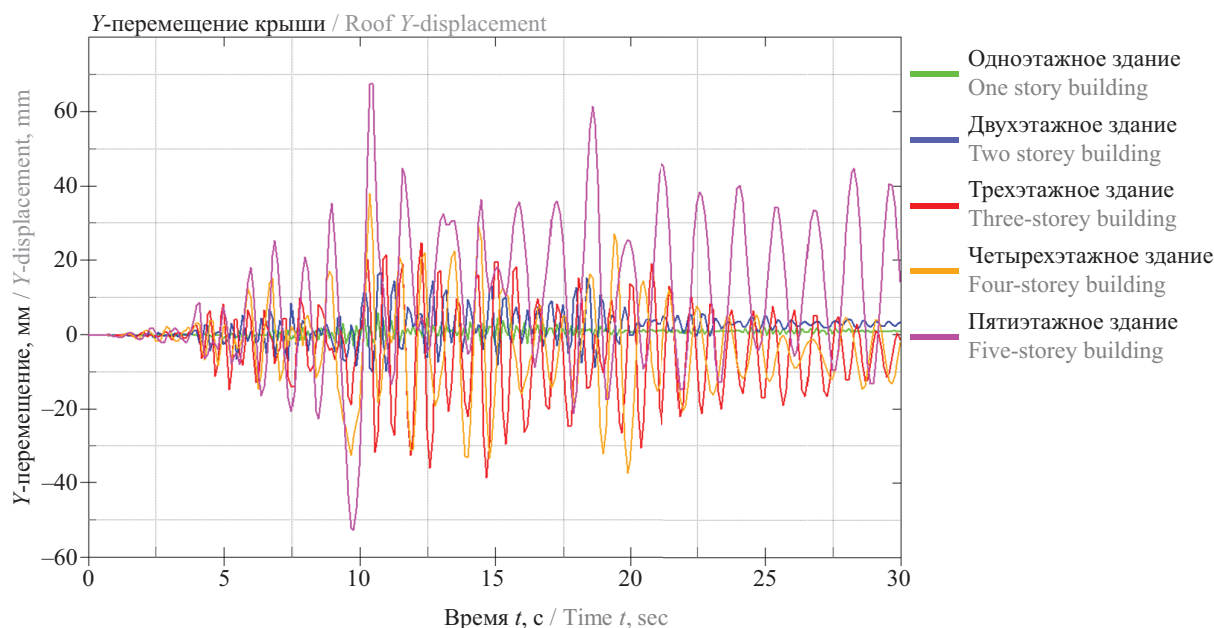


Рис. 8. График перемещения верха каждого здания по Y в процессе 8-балльного землетрясения

Fig. 8. Graph of Y displacement of the roof of each building during the 8-magnitude earthquake

лись в процессе и после землетрясения; приведена деградация первой собственной частоты для каждого исследуемого здания.

Анализ результатов показывает, что при землетрясении интенсивностью 8 баллов имеет место существенное (до 30 %) снижение частот собственных колебаний (рис. 7). Также значительное влияние на деградацию собственных частот оказывает количество этажей. Происходит разрушение бетона в основании колонн и в узлах сопряжения колонн с ригелями (рис. 6). В основании колонн наблюдается рост накопления повреждений и отказ продольной арматуры. На рис. 7 показан график роста количества отказавших элементов в процентах во времени. На рис. 8 представлены графики перемещения верха зданий.

Анализ результатов показывает, что при интенсивном землетрясении в несущих элементах здания возникают существенные повреждения, которые могут быть оценены с помощью проведения численных или натурных исследований. С увеличением этажности интенсивность деградации собственных частот растет, скорость накопления и объем повреждений возрастают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При землетрясении интенсивностью 8 баллов наблюдается существенное (до 30 %) снижение частот собственных колебаний (деградация динамических параметров), что обуславливается значительными повреждениями несущих элементов.

Снижение первых трех частот собственных колебаний происходит равномерно.

Наибольшее количество повреждений возникает на стадии активной фазы сейсмического воздействия.

Для рассмотренных конструктивных систем число отказавших КЭ составляет 10,3 %.

С увеличением этажности отмечается увеличение горизонтальных перемещений в процессе землетрясения.

Разработанная в представленной работе методика позволяет исследовать влияние локальных повреждений несущих конструкций на динамические характеристики в процессе землетрясения с учетом непосредственного армирования бетона арматурными стержнями и может быть использована при проведении научных исследований, расчетов и проектировании несущих железобетонных элементов зданий и сооружений в нелинейной динамической постановке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tosti F., Ferrante C. Using ground penetrating radar methods to investigate reinforced concrete structures // *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 41. Issue 3. Pp. 485–530. DOI: 10.1007/s10712-019-09565-5

2. Esfandiari A., Rahai A., Sanayei M., Bakhtiari-Nejad F. Model updating of a concrete beam with extensive distributed damage using experimental frequency response function // *Journal of Bridge Engineering*.

2016. Vol. 21. Issue 4. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000855

3. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation of a multi-storey monolithic concrete building on the earthquake in nonlinear dynamic formulation // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111. Pp. 545–549. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.039

4. Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M. Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 04013. DOI: 10.1051/mateconf/201825104013

5. Mkrtychev O.V., Busalova M.S., Dorozhinskiy V.B. Verification of the spar model of a reinforced concrete beam // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00124. DOI: 10.1051/mateconf/201711700124

6. Syed Z.I., Hejah E.S., Mohamed O.A. Modeling of dapped-end beams under dynamic loading // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2017. Pp. 242–247. DOI: 10.18178/ijmerr.6.3.242-247

7. Lee J., Zi G., Lee I., Jeong Y., Kim K., Kim W. Numerical simulation on concrete median barrier for reducing concrete fragment under harsh impact loading of a 25-ton truck // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2017. Vol. 139. Issue 2. DOI: 10.1115/1.4035766

8. Novozhilov Y.V., Dmitriev A.N., Mikhayluk D.S. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 636. DOI: 10.3390/buildings12050636

9. Герцик С.М., Новожилов Ю.В., Михалюк Д.С. Численное моделирование динамики и прочности железобетонной плиты под воздействием воздушной ударной волны // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2020. Т. 13. № 3. С. 298–310. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24. EDN OPARMR.

10. Chen H. An Introduction to *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID // *FEA Information Engineering Journal*. 2017. No. Q1(6). Pp. 14–18.

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

12. Sharath R., Arumugam D., Dhanasekaran B., Subash T.R. Numerical modeling of concrete response to high strain rate loadings // *11th European LS-DYNA Conference*. 2017.

13. Pachocki L., Wilde K. Numerical simulation of the influence of the selected factors on the performance of a concrete road barrier H2/W5/B // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 231. P. 01014. DOI: 10.1051/mateconf/201823101014

14. Bulushev S.V., Dudareva M.S. Nonlinear models of reinforced concrete beam elements with the actual reinforcement // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032040. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032040

15. Xu S., Wu P., Liu Z., Wu C. Calibration of CSCM model for numerical modeling of UHPCFTWST columns against monotonic lateral loading // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240. P. 112396. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112396

16. Yin X., Li Q., Xu X., Chen B., Guo K., Xu S. Investigation of continuous surface cap model (CSCM) for numerical simulation of strain-hardening fibre-reinforced cementitious composites against low-velocity impacts // *Composite Structures*. 2023. Vol. 304. P. 116424. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116424

17. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V. Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00123. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123

18. Дурновцева С.А. Метод синтеза сейсмических колебаний, соответствующих заданному семейству спектров ответа // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2013. № 2. С. 112–120.

19. Булушев С.В. Сравнение результатов расчета сооружений на заданные акселерограммы нелинейным статическим и нелинейным динамическим методами // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018. Т. 14. № 5. С. 369–378. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378. EDN YQJUZN.

20. Рауаби А., Урожаев А.В. Исследование нестационарных динамических процессов при помощи вейвлет-анализа // *Строительство: Наука и образование*. 2012. № 4. С. 2.

Поступила в редакцию 21 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 30 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 15 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Олег Вартанович Мкртычев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, директор НИЦ «Надежность и сейсмостойкость сооружений»; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 386561, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; mkrtychev@yandex.ru;

Роман Александрович Зайцев — аспирант, инженер НИЦ «Надежность и сейсмостойкость сооружений»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3163-9522; yanamid123@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tosti F., Ferrante C. Using ground penetrating radar methods to investigate reinforced concrete structures. *Surveys in Geophysics*. 2020; 41(3):485-530. DOI: 10.1007/s10712-019-09565-5
2. Esfandiari A., Rahai A., Sanayei M., Bakhtiari-Nejad F. Model updating of a concrete beam with extensive distributed damage using experimental frequency response function. *Journal of Bridge Engineering*. 2016; 21(4). DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000855
3. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation of a multi-storey monolithic concrete building on the earthquake in nonlinear dynamic formulation. *Procedia Engineering*. 2015 ; 111:545549. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.039
4. Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M. Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:04013. DOI: 10.1051/mateconf/201825104013
5. Mkrtychev O.V., Busalova M.S., Dorozhinskiy V.B. Verification of the spar model of a reinforced concrete beam. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00124. DOI: 10.1051/mateconf/201711700124
6. Syed Z.I., Hejah E.S., Mohamed O.A. Modelling of dapped-end beams under dynamic loading. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2017; 242-247. DOI: 10.18178/ijmerr.6.3.242-247
7. Lee J., Zi G., Lee I., Jeong Y., Kim K., Kim W. Numerical simulation on concrete median barrier for reducing concrete fragment under harsh impact loading of a 25-ton truck. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2017; 139(2). DOI: 10.1115/1.4035766
8. Novozhilov Y.V., Dmitriev A.N., Mikhalek D.S. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation. *Buildings*. 2022; 12(5):636. DOI: 10.3390/buildings12050636
9. Gertsik S.M., Novozhilov Yu.V., Mikhalek D.S. Numerical simulation of the dynamics of a reinforced concrete slab under an air shock wave. *Computational Continuum Mechanics*. 2020; 13(3):298-310. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24. EDN OPARMR. (rus.).
10. Chen H. An introduction to *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID. *FEA Information Engineering Journal*. 2017; Q1(6):14-18.
11. Jiang H., Zhao J. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015; 97:1-19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002
12. Sharath R., Arumugam D., Dhanasekaran B., Subash T.R. Numerical modeling of concrete response to high strain rate loadings. *11th European LS-DYNA Conference*. 2017.
13. Pachocki L., Wilde K. Numerical simulation of the influence of the selected factors on the performance of a concrete road barrier H2/W5/B. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 231:01014. DOI: 10.1051/mateconf/201823101014
14. Bulushev S.V., Dudareva M.S. Nonlinear models of reinforced concrete beam elements with the actual reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032040. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032040
15. Xu S., Wu P., Liu Z., Wu C. Calibration of CSCM model for numerical modeling of UHPCFTWST columns against monotonic lateral loading. *Engineering Structures*. 2021; 240:112396. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112396
16. Yin X., Li Q., Xu X., Chen B., Guo K., Xu S. Investigation of continuous surface cap model (CSCM) for numerical simulation of strain-hardening fibre-reinforced cementitious composites against low-velocity impacts. *Composite Structures*. 2023; 304:116424. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116424
17. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V. Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00123. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123
18. Durnovceva S.A. The synthesis method of seismic vibrations corresponding to a given family of response spectra. *Bulletin of St. Petersburg University. Applied Mathematics. Computer science. Management processes*. 2013; 2:112-120. (rus.).
19. Bulushev S.V. Comparison of the calculation results of structures for specified accelerograms by nonlinear static and nonlinear dynamic methods. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018; 14(5):369-378. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378. EDN YQJUZN. (rus.).
20. Rouabhi A., Urozhaev A.V. Research of non-stationary dynamic processes using wavelet analysis. *Construction: Science and Education*. 2012; 4:2. (rus.).

Received April 21, 2023.

Adopted in revised form on May 30, 2023.

Approved for publication on July 15, 2023.

B I O N O T E S: **Oleg V. Mkrtychev** — Doctor of Technical sciences, Professor, Head of the Department of Strength of Materials, Director of the Research Center “Reliability and Seismic Resistance of Structures”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 386561, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; mkrtychev@yandex.ru;

Roman A. Zaitsev — postgraduate student, engineer of the Research Center “Reliability and Seismic Resistance of Structures”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3163-9522; yanamid123@gmail.com.

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

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730

Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок на вантовое покрытие двоякой кривизны

Владислав Алексеевич Дагаев¹, Георгий Максимович Пурвин¹,
Филипп Сергеевич Школяр²

¹ Спектрум-Холдинг; г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы развитие программирования затрагивает все больше сфер, в том числе и архитектурно-строительную область. В проектной деятельности появляются новые инструменты, позволяющие численно описывать параметры строительных конструкций, при помощи которых легко изменять их формы и конфигурацию. Данное направление дает возможность уйти от более трудоемких и длительных процессов ручного редактирования графических материалов. Такой подход к архитектурному проектированию называют параметрическим моделированием. Без него трудно представить создание сложных геометрических форм здания как многоэтажных, так и большепролетных, к которым можно отнести вантовые покрытия.

Материалы и методы. Процесс оптимизации сбора нагрузок на криволинейные формы нагляднее демонстрировался на примере определения и приложения снеговых и ветровых нагрузок на вантовое покрытие двоякой кривизны здания велодрома, так как, согласно нормативным документам, от геометрии здания зависит коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие и аэродинамический коэффициент, которые, как правило, определяются по результатам продувки, однако для уменьшения трудоемкости исследования зоны распределения этих коэффициентов интерполировались по уже имеющимся в нормативных документах формам.

Результаты. Выполнен сбор нагрузок на расчетную конечно-элементную схему здания велодрома с покрытием двоякой кривизны по ортогональной вантовой сети, в том числе 4 типа снеговой нагрузки и 2 типа ветровой нагрузки.

Выводы. Использование Grasshopper позволило уйти от упрощения и интерполяции как величины давления от снега и ветра в нескольких направлениях, так и значений грузовых площадей в каждой точке вантовой сети. Такой более точный подход в совокупности с результатами аэродинамических испытаний и автоматизированной передачи данных в расчетные комплексы позволит более точно определять НДС сложных покрытий, уйти от перерасчета и переназначения сложных неравномерно распределенных линейных и нелинейных нагрузок в расчетных схемах при изменении исходных данных с экономией трудовых и временных затрат на контроль этих процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: параметрическое моделирование, Grasshopper, конечно-элементный расчет, большепролетное здание, сложнораспределенная нагрузка, вантовое покрытие, снеговая нагрузка, ветровая нагрузка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дагаев В.А., Пурвин Г.М., Школяр Ф.С. Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок на вантовое покрытие двоякой кривизны // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1713–1730. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730

Автор, ответственный за переписку: Владислав Алексеевич Дагаев, dagaev@spgr.ru.

Optimization of determination and application of complexly distributed loads on a double curvature cable-stayed covering

Vladislav A. Dagaev¹, Georgii M. Purvin¹, Filipp S. Shkoliar²

¹ Spectrum-Holding; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. In recent years, the development of programming affects more and more spheres, including the architectural and construction field. New tools appear in the design activity allowing to describe numerically the parameters of building structures, with the help of which it is easy to change their shape and configuration. This direction allows to get away from more labour-intensive and time-consuming processes of manual editing of graphic materials. This approach to architectural design is called parametric modelling. Without it, it is difficult to imagine the creation of complex geometric shapes of buildings, both multi-storey and large-span, to which cable-stayed coverings can be referred. The interest in such structures, due to their impressive shaping, has turned their design into a complex engineering and technical task and actual work.

Materials and methods. The process of optimization of the collection of loads on curvilinear forms was more clearly demonstrated on the example of determination and application of snow and wind loads on the cable-stayed covering of double curvature of the velodrome building, as, according to normative documents, the geometry of the building depends on the transition coefficient from the weight of the snow cover of the ground to the snow load on the covering and the aerodynamic coefficient, which, as a rule, are determined by the results of blowing, but in order to reduce the labour intensity of the study, the distribution zones of these coefficients were interpolated according to the forms already available in normative documents.

Results. A collection of loads on the computational finite element scheme of the velodrome building with a double curvature covering by an orthogonal cable-stayed network, including 4 types of snow load and 2 types of wind load, was performed.

Conclusions. The use of Grasshopper made it possible to get away from simplification and interpolation of both the magnitude of pressure from snow and wind in several directions and the values of load areas at each point of the cable-stayed network. This more accurate approach together with the results of aerodynamic tests and automated data transfer to the calculation systems will allow to determine more accurately the SSS of complex coverings, to avoid recalculation and reassignment of complex non-uniformly distributed linear and nonlinear loads in the calculation schemes when changing the initial data with saving labour and time costs for the control of these processes.

KEYWORDS: parametric modelling, Grasshopper, finite element calculation, large-span building, complexly distributed load, cable-stayed covering, snow load, wind load

FOR CITATION: Dagaev V.A., Purvin G.M., Shkoliar F.S. Optimization of determination and application of complexly distributed loads on a double curvature cable-stayed covering. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1713-1730. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730 (rus.).

Corresponding author: Vladislav A. Dagaev, dagaev@spgr.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все больше физических явлений и процессов стало возможно смоделировать без использования натуральных испытаний. Это было достигнуто при помощи развития программирования, упрощения написания кодов и уравнений. Их применение наблюдается в разных отраслях, в частности в проектировании конструкций и архитектуре. В архитектурно-строительном проектировании существующие инструменты моделирования и анализа являются чрезвычайно мощными и дают возможность генерировать и анализировать практически любые формы. Однако большинство из них не позволяют проектировщикам оперативно получать и анализировать сгенерированные формы и оболочки. Поскольку эксплуатационные характеристики конструкции сильно связаны с архитектурной геометрией, имеется потребность в вычислительных стратегиях, позволяющих постоянно получать, анализировать и корректировать получаемые характеристики проектируемых объектов на каждой стадии разработки. С введением вычислений архитекторы и конструкторы уходят от макетного моделирования на ранних стадиях и используют 3D-моделирование с помощью «ндового» программирования. «Ноды» в таком программировании архитектуры можно понимать как набор инструкций, присваивающих определенные атрибуты конструкций или предписывающих процесс манипулирования ими, что дает возможность быстро исследовать сложные геометрии и может быть объединено с алгоритмами анализа и оптимизации для проектирования, ориентированного на производительность. Цифровое моделирование и визуализация архитектурных форм зданий стало эталоном в работе архитекторов и является неизбежным в архитектурном образовании. Из оригинальных 2D-программ, используемых для рисования архитектурных проек-

тов, программное обеспечение теперь превратилось в интеллектуальные 3D-программные пакеты, основанные на параметрическом моделировании [1, 2].

Путем использования параметрического моделирования, зная правильные входные параметры и понимая геометрическую логику, архитекторы могут добиться одновременно сложной эстетической формы и эффективного функционального дизайна.

Параметрическое моделирование — это новый подход к архитектурному проектированию, использующий алгоритмы для генерации виртуальных объектов. Объект или элементы модели могут быть созданы автоматически на основе внутренних логических аргументов, так называемых «нодов», а не перестраивая элементы вручную [3, 4].

В рамках этого процесса проектирования архитекторы могут решать визуальные, перцептивные, материальные и структурные проблемы, достигая при этом значительного улучшения времени и точности. Результатом, с которым будет работать проектировщик, будет параметрическая модель.

Параметрическая модель — это компьютерное представление проекта, выполненное с помощью геометрических фигур с постоянными и переменными свойствами. Переменные свойства называются параметрами. Проектировщик может изменять параметры в параметрической модели для поиска различных альтернативных решений проблем в модели. Параметрическая модель получается автоматически путем изменения единственных параметров без необходимости изменения или перерисовки [5, 6].

Переход к параметрическому моделированию строительных конструкций, вероятно, повлияет на практику проектирования множеством способов. Непосредственное влияние на ранних стадиях внедрения в любой проектной практике будет заключаться в повышении производительности проектировщика при разработке проектной документации.

Авторами на основе затраченного количества часов на проектирование и детализовку железобетонных строительных конструкций в нескольких вариантах по технологии параметрического моделирования было выполнено исследование, по результатам которого выявлен прирост производительности. По консервативным оценкам — от 15 до 41 % [7].

Помимо вышесказанного, параметрическое моделирование позволяет решать сложные инженерные задачи, такие как проектирование конструкций со сложной геометрической формой покрытия.

На рубеже XX в. российский инженер Владимир Шухов разработал всемирно известный способ проектирования гиперболоидных конструкций и металлических сетчатых оболочек строительных конструкций. Его филигранные конструкции — от решетчатой оболочки до висячей крыши — неподвластны времени в своей экономичности, легкости и, не в последнюю очередь, простоте. Сочетая глубокие геометрические и механические знания, В. Шухову удалось создать удивительно прагматичные конструкции. Решающей стратегией для упрощения была преднамеренная, упругая и пластическая деформация Z , L и плоских стальных профилей в непрерывно изогнутые элементы конструкции. В результате В. Шухов смог собрать сложные решетки двойной кривизны, используя только повторяющиеся компоненты и простые заклепочные соединения.

В. Шухов заложил основы проектирования металлических конструкций, которые используются и по сегодняшний день. Помимо решетчатых конструкций его знания применяют и в проектировании конструкций сложной формы, таких как большепролетные кровли и кровли криволинейной формы [8].

Большепролетные покрытия вызывают повышенный интерес в течение последних шестидесяти лет. Арковидная стальная крыша велодрома с максимальным пролетом, высотой и длиной, равными 109,5, 23,07 и 126 м соответственно, была выбрана как объект исследования. Выбор предпочтительного конструктивного решения и анализ поведения несущих элементов большепролетной арки велодрома являются целью исследования [9].

Разработаны новые методы создания сложных геометрических форм зданий с крышей из множества складчатых оболочек, созданных на основе новой многогранной сети и расположенных в соответствии с поверхностью отрицательной гауссовой кривизны. Они позволяют преодолеть существующие значительные геометрические и материальные ограничения, связанные с формообразованием номинально плоских прямоугольных складчатых стальных листов [10]. Благодаря гофрированию эти конструкции обладают исключительной особенностью: волнистая форма в их кромке обеспечивает значительное улучшение их структурного поведения, увеличивая изгибную жесткость на краю и позволяя уменьшить его толщину. Более того, если

рассматривать нелинейное поведение, то гофрирование куполов играет важную роль в явлениях устойчивости. Проблемой при исследовании такого рода оболочек служит определение математической и геометрической модели построения подходящей сетки для проведения структурного анализа [11].

Примером применения оболочечных конструкций могут быть кровельные конструкции от schlaich bergemann partner, павильон Porsche и навес для выхода из клиентского центра, которые были недавно построены в «Автоштадте» в Вольфсбурге, Германия, всего в 200 м друг от друга. Обе крыши легкие и двускатные, но одна работает в основном на сжатие и использует гофрированные оболочки, а другая представляет собой предварительно напряженную растягивающуюся конструкцию вантовой сети, которая также является отличным решением задачи по перекрытию большого пролета, но недостаточно исследована [12, 13].

Интерес к вантовым покрытиям сооружений в последнее время также превратил проектирование таких покрытий в актуальную инженерную проблему, требующую дополнительных исследований. Этому способствуют не только экономические преимущества вантовых покрытий, но и развитие методов расчета и методик проектирования. Ведутся научные работы, связанные с исследованием статических, динамических и кинематических свойств вантовых систем с использованием компьютерных технологий. В результате здания и сооружения с применением вантовых систем получают все более широкое распространение, такие как покрытия общественных и промышленных большепролетных зданий, вантовые мосты и путепроводы [14–16].

На данный момент существует множество статей с анализом пространственной работы вантовой сети: в некоторых из них представлены новые конструкции покрытия для большепролетных зданий — цилиндро-плитно-вантовое покрытие (ЦПВ), объединяющее в себе три вида конструкций: цилиндрическую оболочку нулевой гауссовой кривизны, плоского и вантового (висячего) покрытий [17]. Как известно, особенность подобных расчетов заключается в том, что при их выполнении нельзя использовать ряд известных теорий и законов строительной механики, таких как принцип возможных перемещений и взаимности работ, закон независимости действия сил и др. [18]. Исследовано влияние податливости отрезков вант на смещения и напряжения вантовых конструкций в геометрически нелинейном анализе провисающих и натянутых тросовых конструкций с учетом нелинейной работы материала под действием собственного веса, предварительного натяжения и внешних нагрузок [19].

А также новые модели пучков вантовой сети, которые учитывают влияние угла укладки на поперечное сечение нити, приводящее к меньшим осевым усилиям и крутящему моменту, но более силь-

ной пластической деформации, различия в которых изменяются с увеличением угла укладки и внешнего диаметра проволоки [20].

Авторами [21] произведено численное исследование, в котором для одной и той же конструкции кровли предложены четыре различные системы: плоская ферма, пространственная ферма, вантовая плоская ферма и вантовая пространственная ферма. Для каждой системы проводился структурный анализ при всех комбинациях расчетных нагрузок и был сделан вывод, что пространственная ферма и вантовая пространственная ферма обеспечивают наиболее эффективную работу, а также экономичность.

В нынешней строительной практике есть немало случаев разрушения конструкций под воздействием, вызванным ветром, снегом, и их совместным воздействием на большепролетные пространственные конструкции, это свидетельствует о недостаточном исследовании повреждений, вызванных этими явлениями. Поэтому для инженерной практики важно определить глобальную надежность большепролетных пространственных конструкций с учетом совместного воздействия ветра и снега [22, 23].

Процесс сбора нагрузок на вантовую сеть — важный аспект в обеспечении безопасности большепролетных конструкций с изогнутой кровлей. Он достаточно сложный, так как при отсутствии оптимизации нагрузку придется задавать вручную на каждый конечный элемент вантовой сети, что может привести к множеству ошибок.

Решением данной инженерной задачи станет использование среды параметрического моделирования Rhinoceros и Grasshopper. Выбрано применение среды параметрического моделирования Grasshopper как способа задания и сбора нагрузок на покрытие двойкой кривизны из вантовой сети здания велодрома.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы проиллюстрировать процесс оптимизации сбора нагрузок на криволинейные формы наиболее наглядно, можно использовать примеры определения снеговой и ветровой нагрузок. Это связано с тем, что в соответствии с нормативными документами¹ коэффициент перехода от веса снежного покрова на земле к нагрузке снега на покрытие и аэродинамический коэффициент зависят от геометрии здания и покрытия, которые, как правило, определяются путем моделирования продувки или натурными испытаниями в аэродинамических трубах [24].

Объект исследования — здание велодрома с вантовым покрытием двойкой кривизны (рис. 1),

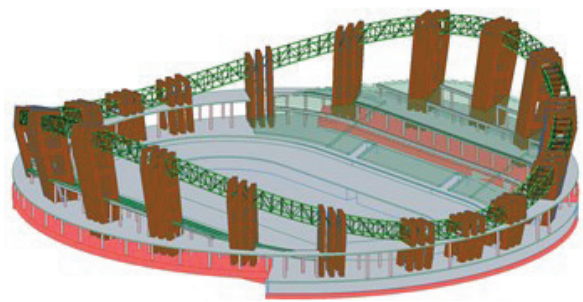


Рис. 1. Расположение основных несущих конструкций (вантовая сеть условно не показана)

Fig. 1. Location of the main load-bearing structures (cable-stayed network is conventionally not shown)

расчет которого является основной целью данной работы [25].

Предполагаемым расположением велодрома для определения снеговой и ветровой нагрузок стал г. Новосибирск. Авторами [26] был описан процесс построения геометрии здания и определения параметров несущих конструкций.

Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия¹:

$$S_0 = c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g.$$

С определением коэффициентов c_e , c_t проблем не возникает, как и с установлением значения S_g [25]. Основная сложность заключается в опре-

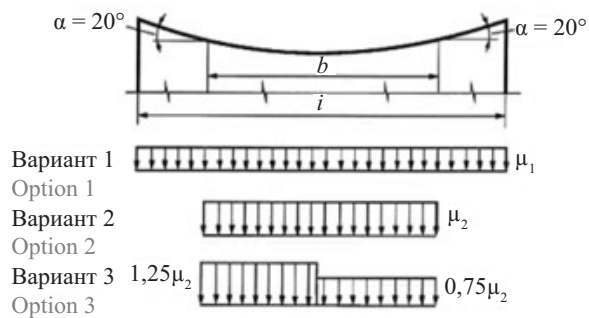


Рис. 2. Схема для определения коэффициента формы для висячих покрытий цилиндрической формы

Fig. 2. Scheme for determining the shape factor for cylindrically shaped hanging coverings



Рис. 3. Несущие ванты с переменным шагом перекрываемого пролета (стабилизирующие ванты условно не показаны)

Fig. 3. Load-bearing cables with variable span spacing (stabilizing cables are conventionally not shown)

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М. : Минстрой России, 2017. С. 87.

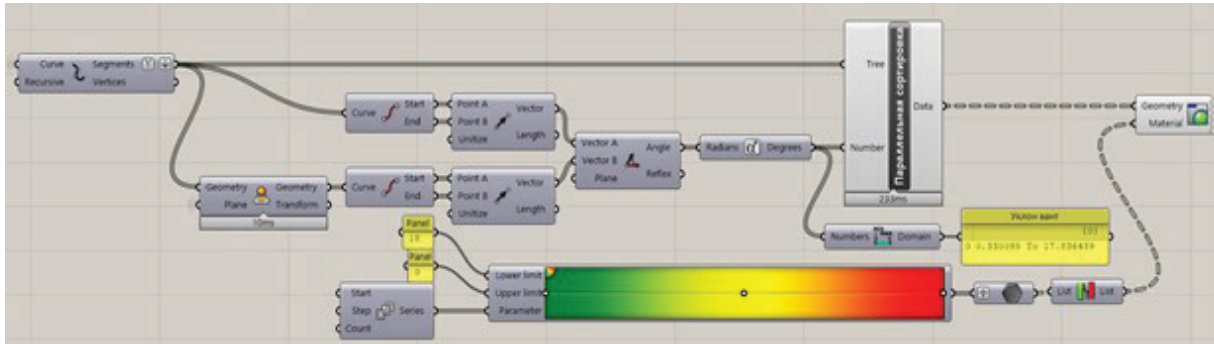


Рис. 4. Фрагмент кода, определяющий уклон несущих вант с отображением градиента

Fig. 4. Code fragment defining the slope of the load-bearing cables with gradient display

делении μ , где μ — коэффициент формы, учитывающий переход от веса снежного покрова на земле к нагрузке снега на покрытие, однако в нормативной литературе отсутствует указание на зоны распределения значения коэффициента формы для круглых зданий с висячим покрытием двоякой кривизны. Наиболее подходящей схемой для определения коэффициента формы являются висячие покрытия цилиндрической формы¹ (рис. 2).

Поскольку нагрузка на покрытие передается только через несущие ванты, то покрытие двоякой кривизны можно представить в виде здания цилиндрической формы с переменным значением пролета и шага ортогональной вантовой сети. Для каждой нити (рис. 3) будут свои параметры b и l , от которых зависит коэффициент формы μ .

Несущие ванты делятся на части в точках пересечения со стабилизирующими. Спроецировав их на плоскость XU , определяется уклон вант (рис. 4).

На рис. 5 отображен результат работы скрипта с проектным уклоном вант, который изменяется

от 0 до 17°. Темно-зеленый цвет имеют участки вант с уклоном от 16 до 17°. Красный цвет — участки вант с уклоном от 0 до 1°.

Учитывая то, что угол наклона кровли представленной схемы менее 20° (рис. 5), для всех вант $b = l$ и $\mu_2 = l/b = 1$. Таким образом, 1-й и 2-й варианты (рис. 2) распределения снеговой нагрузки на покрытие являются одинаковыми.

Нормы не предусматривают учет неравномерного распределения снега по большинству форм висячих покрытий, а данные, полученные в нормативном документе² (рис. 6), являются первичными и необязательными.

Рассмотрение расчетной модели в данной постановке не принимает во внимание вероятность реального возникновения таких нагрузок, а лишь учитывает возможный перенос снега ветром, ча-

² СП 457.1325800.2019. Сооружения спортивные для велосипедного спорта. Правила проектирования. М. : Минстрой России, 2019. С. 20.

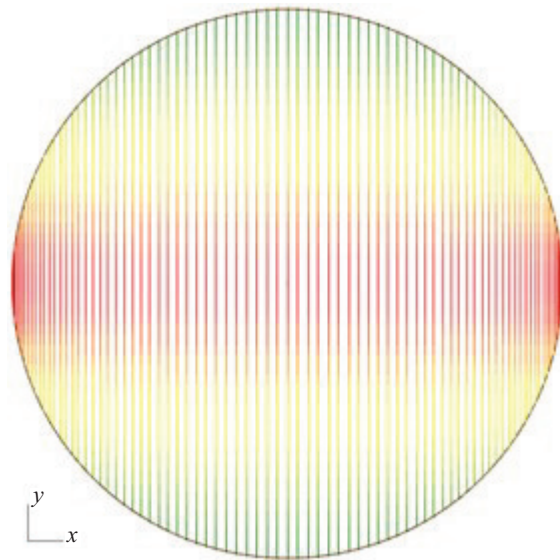


Рис. 5. Визуализация величины угла наклона несущих вант к горизонту, полученная с помощью Grasshopper

Fig. 5. Grasshopper visualization of the angle of inclination of the load-bearing cables to the horizon

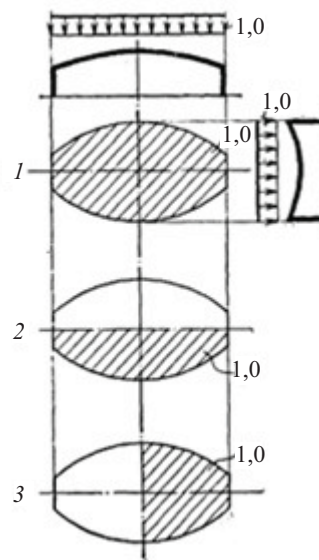


Рис. 6. Данные по фактическому распределению снега по поверхности покрытия, выраженные через коэффициент μ

Fig. 6. Data on the actual snow distribution over the covering surface, expressed through the coefficient μ

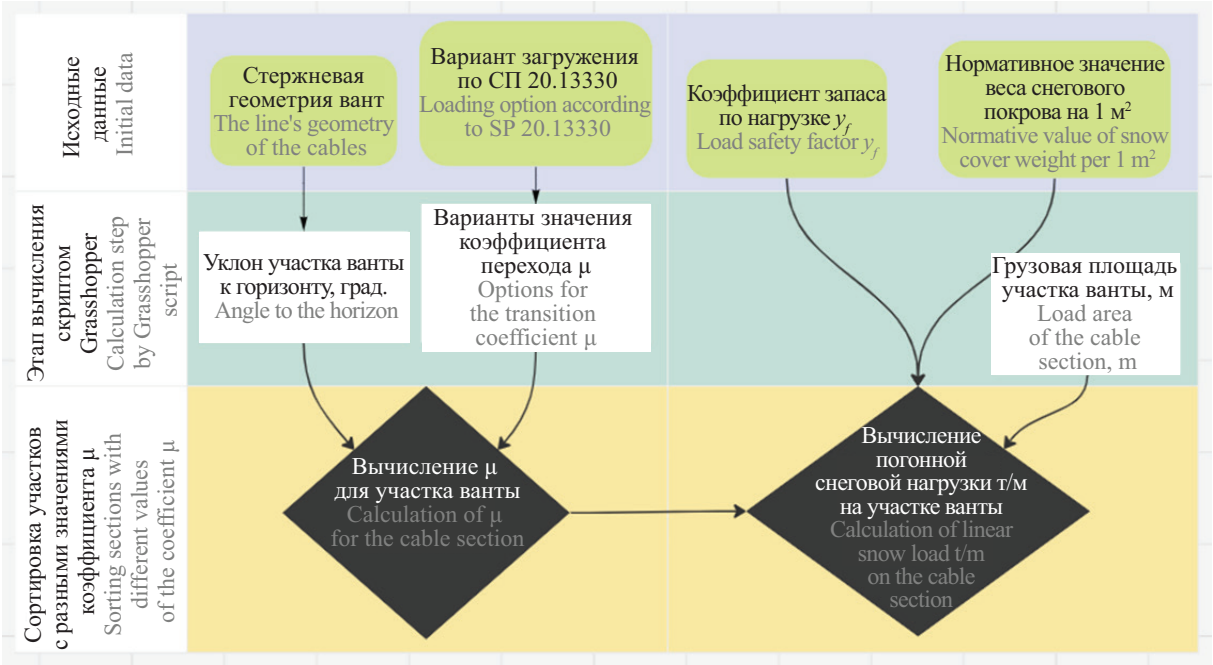


Рис. 7. Блок-схема скрипта Grasshopper с определением нагрузки для разных вариантов загрузжений
Fig. 7. Block diagram of Grasshopper script with load detection for different load variants

стичную очистку покрытия от снега и др. Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) расчетной схемы таким методом не учитывает реальное распределение максимальных усилий и возникающих перемещений в конструкциях.

Фрагмент кода для определения снеговых нагрузок по несущим вантам с помощью Grasshopper представлен в работе [25]. На рис. 7 приведена блок-схема скрипта с определением нагрузки для разных вариантов загрузжений.

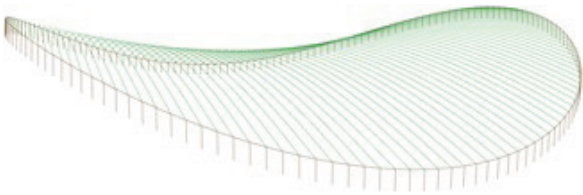


Рис. 8. Стабилизирующие ванты с переменным шагом перекрываемого пролета (несущие ванты условно не показаны)
Fig. 8. Stabilizing cables with variable spacing of the span to be bridged (supporting cables are conventionally not shown)

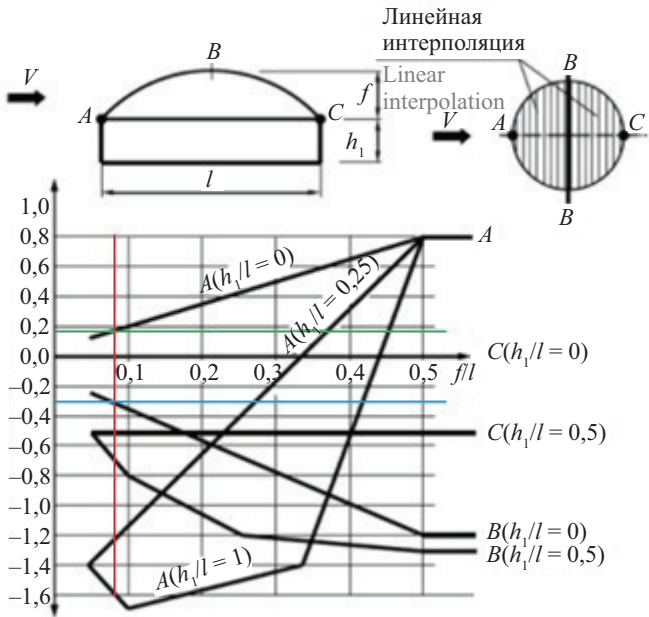


Рис. 9. Схема распределения аэродинамического коэффициента (Приложение В1.4, 23)
Fig. 9. Aerodynamic coefficient distribution diagram (App. B1.4, 23)

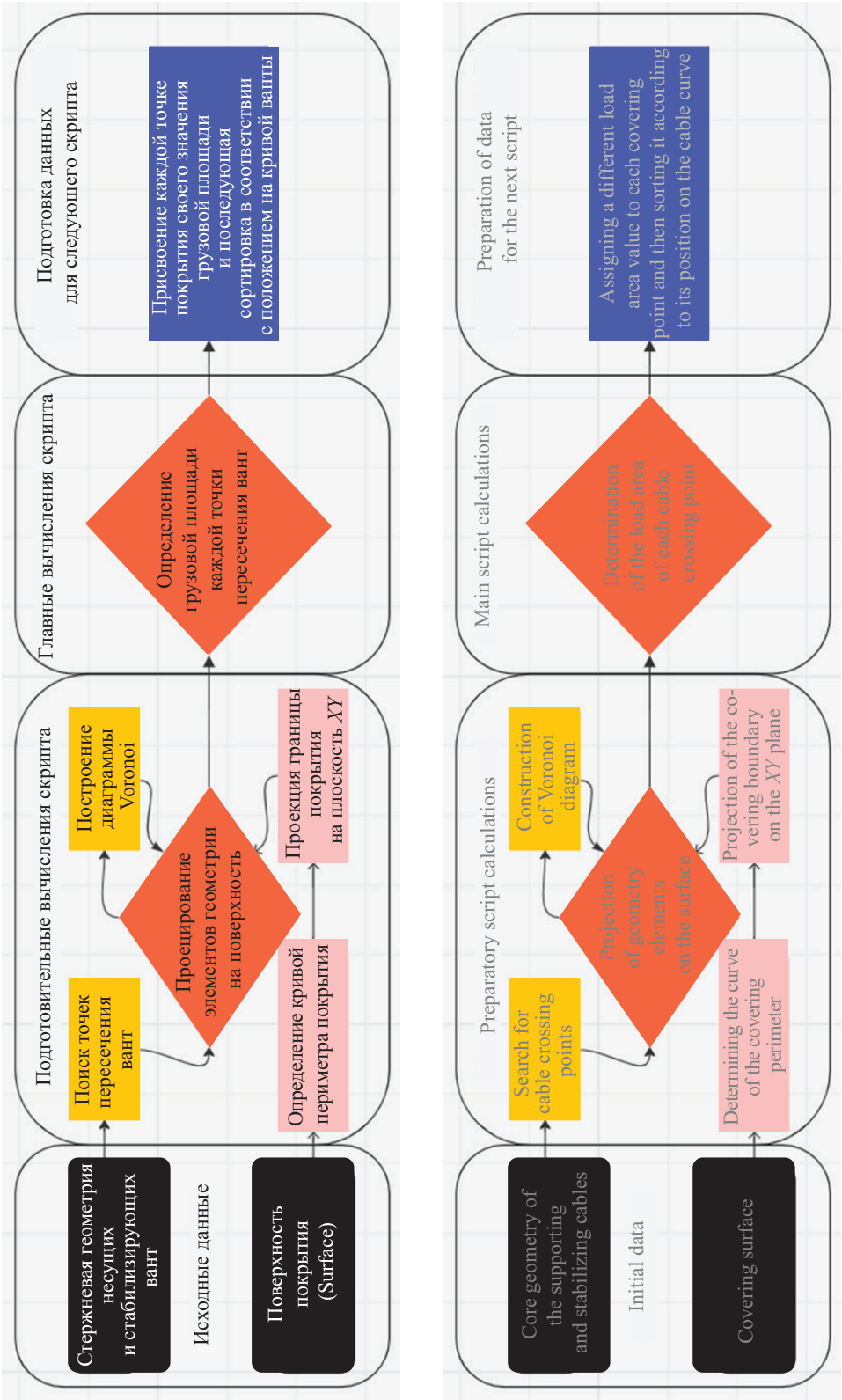


Рис. 10. Блок-схема скрипта построения геометрии для определения ветровых нагрузок в Grasshopper
Fig. 10. Block diagram of the geometry script for determining wind loads in Grasshopper

В легких покрытиях неравномерное давление ветра вызывает большие деформации покрытия и даже явление аэродинамической неустойчивости покрытия, т.е. его вибрацию, поэтому к определению ветровой нагрузки необходимо подходить с особой точностью.

Рассматриваются два варианта действия ветровой нагрузки: вдоль несущих и вдоль стабилизирующих вант. Во всех случаях значение основной нормативной ветровой нагрузки вычисляется согласно выражению [3]:

$$W = W_m + W_p.$$

Определим среднюю (статическую) составляющую ветровой нагрузки W_m по формуле¹:

$$W_m = W_0 \cdot k(z_e) \cdot c.$$

Значения W_0 и $k(z_e)$ устанавливаются согласно нормативному документу¹, аэродинамический коэффициент c и схемы его распределения для круглых в плане покрытий двойкой кривизны в нормативных документах¹ отсутствуют.

Для предварительной оценки предлагаем рассмотреть такое покрытие, как купольное, круглое в плане, по аналогии со случаем определения снеговой нагрузки. Вместо несущих вант формообразующими здесь являются стабилизирующие ванты, показанные на рис. 8. Несущие ванты передают нагрузку через узлы пересечения со стабилизирующими. Если ветер направлен вдоль стабилизирующих вант, то можно использовать распределение аэродинамического коэффициента, аналогичное схеме для круглых зданий с купольным покрытием¹.

В случае купольных покрытий значения коэффициентов c_e постоянны вдоль сечений, параллельных оси $B-B$, их значения в точках A и C , а также в сечении $B-B$ приведены на рис. 9. Для промежуточных сечений коэффициенты c_e могут быть установлены с помощью линейной интерполяции.

Для определения значения c_e в точках A , B и C :

$$\frac{f}{l} = \frac{10,50}{130} = 0,08; \quad \frac{h_1}{l} = \frac{3,50}{130} = 0,027 \approx 0.$$

В точке A : $c_e = 0,18$, $W_m^A = 0,039 \cdot 1,23 \cdot 0,18 = 0,009 \text{ т/м}^2$.

В сечении B : $c_e = -0,3$, $W_m^B = 0,039 \cdot 1,23 \times (-0,3) = -0,014 \text{ т/м}^2$.

В точке C : $c_e = 0$, $W_m^C = 0$.

Нагрузка от ветра прикладывается к узлам пересечения несущих и стабилизирующих вант. Каждая такая точка имеет собственную грузовую площадь. Чтобы уменьшить количество трудовых и временных затрат для расчета ветровой нагрузки используем Grasshopper. На рис. 10 показана блок-схема скрипта построения геометрии для определения ветровых нагрузок.

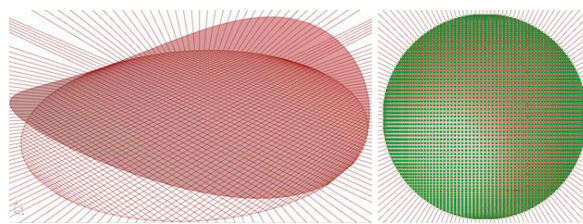


Рис. 11. Ячеистая структура Voronoi на плоскости XY , построенная вокруг точек пересечения несущих и стабилизирующих вант

Fig. 11. Voronoi cellular structure on the XY plane, built around the intersection points of load-bearing and stabilizing cables

Для дальнейшего анализа схемы вантового покрытия перейдем к его построению. С помощью инструмента Voronoi предлагается построить ячеистую структуру на плоскости XY . Инструмент ищет точки на равноудаленном расстоянии от заданных и объединяет их полилиниями в ячейки на рис. 11.

Центрами полученных ячеек являются спроецированные на эту же плоскость точки пересечения стабилизирующих и несущих вант. Обратное проецирование полученной структуры на поверхность покрытия даст грузовую площадь точки пересечения вант. Так как число точек порядка 3800 штук, то проецирование и построение сразу всей структуры на поверхности покрытия требует очень больших мощностей компьютера. С помощью параллельной сортировки разделим точки и грузовые площади на «ветки данных». Каждая «ветка данных» объединяет точки и структуры, располагающиеся на одной из вант. На рис. 12 показана блок-схема скрипта для параллельной сортировки геометрии для определения ветровых нагрузок.

Исходя из координаты Y , аэродинамический коэффициент c_e меняет свое значение и знак в точках стабилизирующей ванты. Чтобы разделить точки на две группы с отрицательными и положительными координатами используется скрипт, показанный в работе [25]. На рис. 13 приведена блок-схема этого скрипта.

Для определения величины нормативной средней составляющей ветровой нагрузки, действующей по нормали к площадке на поверхности покрытия, строились поверхности, образованные грузовой площадью точки пересечения, стабилизирующих и несущих вант. Значения нагрузки выгружаются в формат .txt или .csv.

Визуализация идеи написанного скрипта представлена на рис. 14, результатом его работы является построение вектора направления действия нагрузки от ветра.

Для определения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p на здание велодрома было использовано допущение, что здание можно считать одноэтажным и однопролетным, у которого отношение высоты к пролету не превышает 1,5. Это

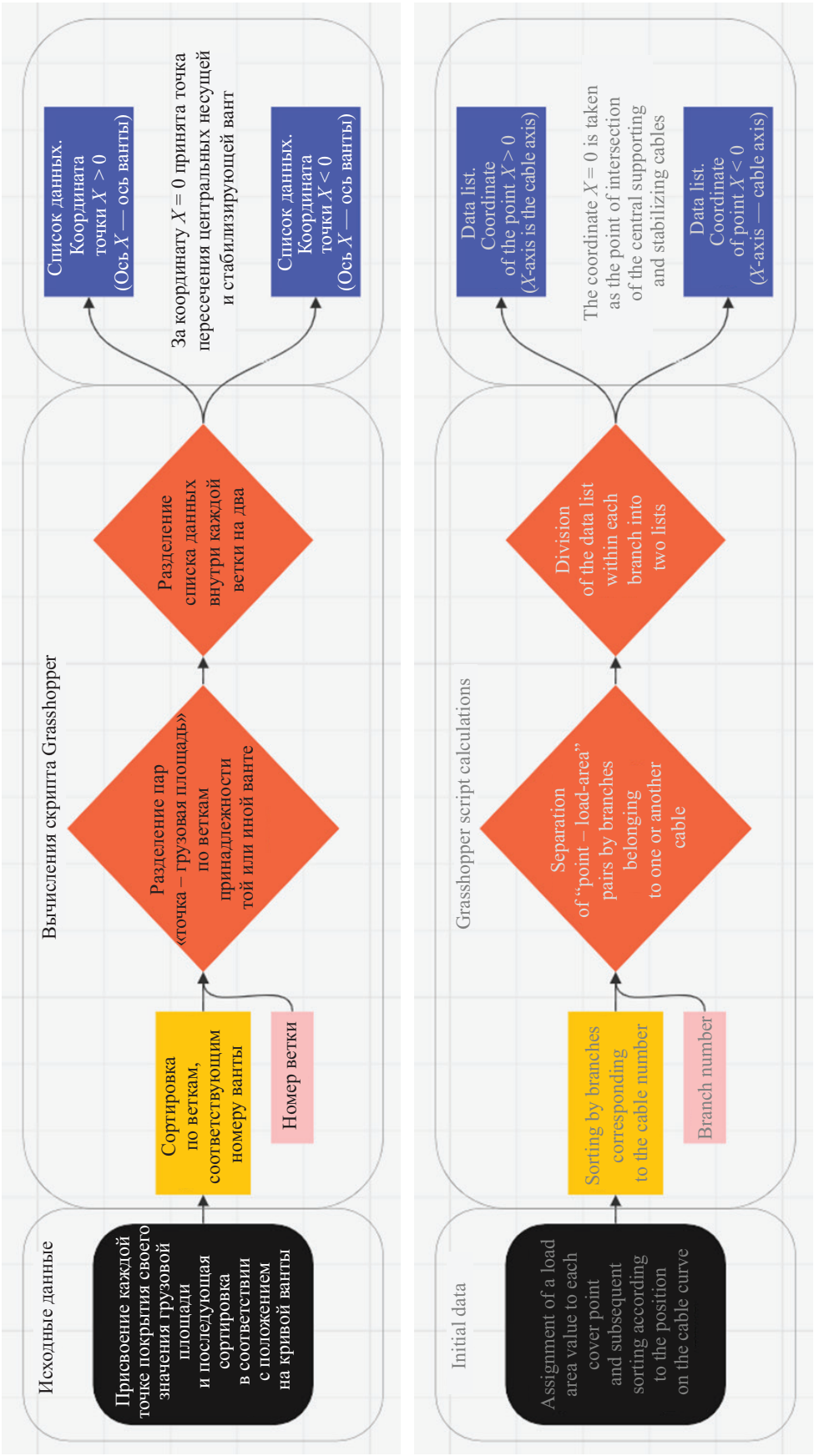


Рис. 12. Блок-схема скрипта Grasshopper для параллельной сортировки геометрии для определения ветровых нагрузок
Fig. 12. Block diagram of the Grasshopper script for parallel sorting of geometry to determine wind loads

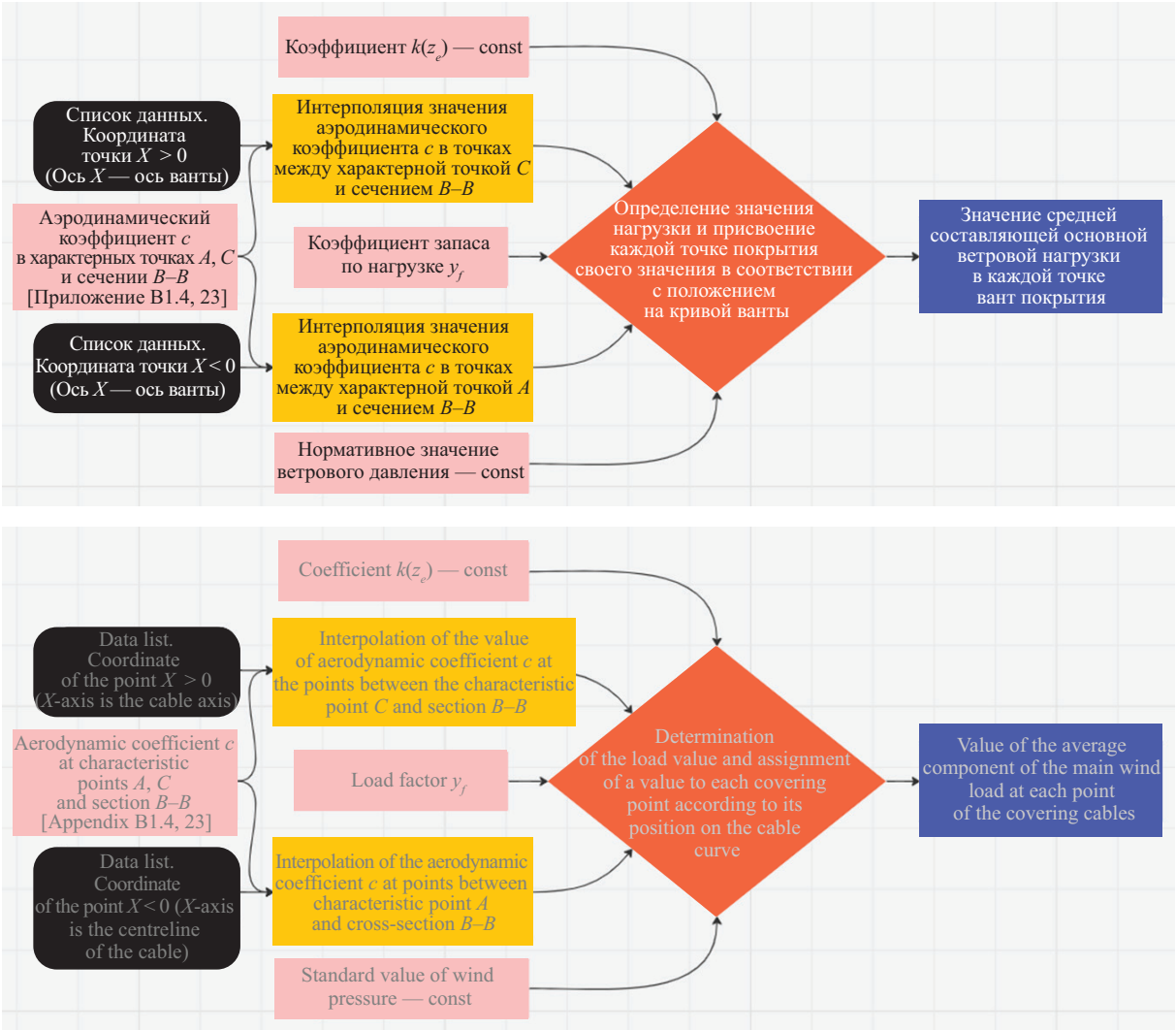


Рис. 13. Блок-схема скрипта для определения величины средней составляющей ветровой нагрузки

Fig. 13. Block diagram of the script for determining the value of the average wind load component

допущение позволило определить коэффициент v для расчетной поверхности, расположенной в плоскости XY и близкой по форме к прямоугольнику по рис. 9, что далее применялось для расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки [25].

Первая собственная и предельные частоты для данного случая определены в работе [25]. Первая собственная частота здания велодрома больше предельной: $f_1 = 2,0034 \text{ Гц} > f_{lim} = 1,94 \text{ Гц}$, получаем, что:

1. В точке A : $c_e = 0,18$,
 $W^A = W_m^A + W_p = 0,009 + 0,019 = 0,028 \text{ т/м}^2$.
2. В сечении B : $c_e = -0,3$,
 $W^B = -(|W_m^B| + |W_p|) = -(0,014 + 0,019) = -0,033 \text{ т/м}^2$.
3. В точке C : $c_e = 0$, $W_m^C = 0$.

Фрагмент кода, представленный в исследовании [25], определяет вектор, который перпендикулярен поверхности грузовой площади точки. Для задания ветровой нагрузки на расчетную схему этот вектор должен быть разложен на компоненты, действующие в направлении X и Z . В Grasshopper это

реализовано через определение синусов и косинусов между глобальными координатными осями X и Z и локальными осями грузовых площадей точек. На рис. 15 показана блок-схема этого кода.

Исследования аэродинамического коэффициента, проведенные К.А. Бабаевой [27], показали, что его зависимость от многих параметров здания, учитывающая изменение скоростного напора по высоте и направлению, затрудняет обобщенную рекомендацию. Данные на рис. 16 демонстрируют, что ветер на подавляющей части поверхности большинства покрытий оказывает отрицательное давление (отсос), которое достигает значения в диапазоне от $0,020$ – $0,031 \text{ т/м}^2$, а иногда и до $0,061 \text{ т/м}^2$.

Данные об амплитуде изменения нагрузки на каждой ванте были экспортированы из Grasshopper в формат .xlsx и затем импортированы в ПК Лира Софт для расчета вантовой сети с учетом разложения вектора нагрузки на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 17).

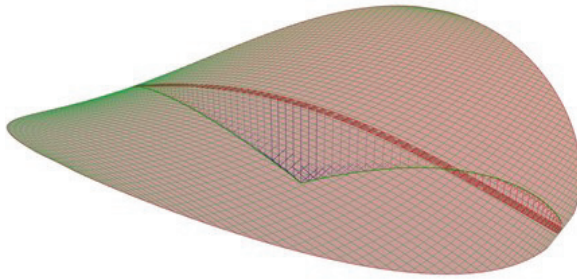


Рис. 14. Визуализация фрагмента кода для определения величины нормативной средней составляющей ветровой нагрузки для центральной стабилизирующей ванты

Fig. 14. Visualization of a code fragment for determining the value of the normative average wind load component for the central stabilizing cable

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате написанного скрипта были построены эпюры распределения снеговой нагрузки в ПК Лира Софт. На рис. 18–21 представлены 4 схемы распределения снеговой нагрузки, собранной на рассматриваемое покрытие двойкой кривизны. Схема 1 и 2 соответствует вариантам 1 и 3 в нормативной документации¹, схемы 3 и 4 соответствуют вариантам 2 и 3, указанным на рис. 6, полученным в нормативном документе².

1. Вариант 1¹. Нормативное значение снеговой нагрузки (рис. 18):

$$S_0 = 0,153 \cdot \mu = 0,153 \cdot 1 = 0,153 \text{ т/м}^2.$$

2. Вариант 3¹. Нормативное значение снеговой нагрузки (рис. 19):

$$S_0^1 = 0,153 \cdot \mu_1 = 0,153 \cdot 1,25 = 0,191 \text{ т/м}^2;$$

$$S_0^2 = 0,153 \cdot \mu_1 = 0,153 \cdot 0,75 = 0,115 \text{ т/м}^2.$$

3. Вариант (рис. 6, 2). Нормативное значение снеговой нагрузки слева от оси симметрии покрытия (рис. 20):

$$S_0 = 0,153 \cdot \mu = 0,153 \cdot 1 = 0,153 \text{ т/м}^2.$$

4. Вариант (рис. 6, 3). Нормативное значение снеговой нагрузки ниже оси симметрии покрытия (рис. 21):

$$S_0 = 0,153 \cdot \mu = 0,153 \cdot 1 = 0,153 \text{ т/м}^2.$$

Результаты определенных значений ветровой нагрузки в точках А, С и сечении В–В при ситуации, когда ветер вдоль стабилизирующих вант, приведены в табл. 1.

Схема приложения вертикальной составляющей ветровой нагрузки представлена на рис. 22, горизонтальной составляющей — на рис. 23.

С учетом рис. 16 было выполнено формирование загрузки (см. табл. 2) при воздействии ветра вдоль направления несущих вант с использованием экспериментального распределения аэродинамического коэффициента, так как в нормативной документации [27] не было найдено схемы, которая бы описывала близкое распределение аэродинамического коэффициента.

Значения давления ветра, указанные в табл. 1 и 2, показывают, что основное нормативное значение давления ветра превышает нормативное пиковое значение. Это связано с тем, что при увеличении площади конструкции вероятность достижения пикового ($v_{\mp} = 1$) уровня корреляции ветрового потока уменьшается.

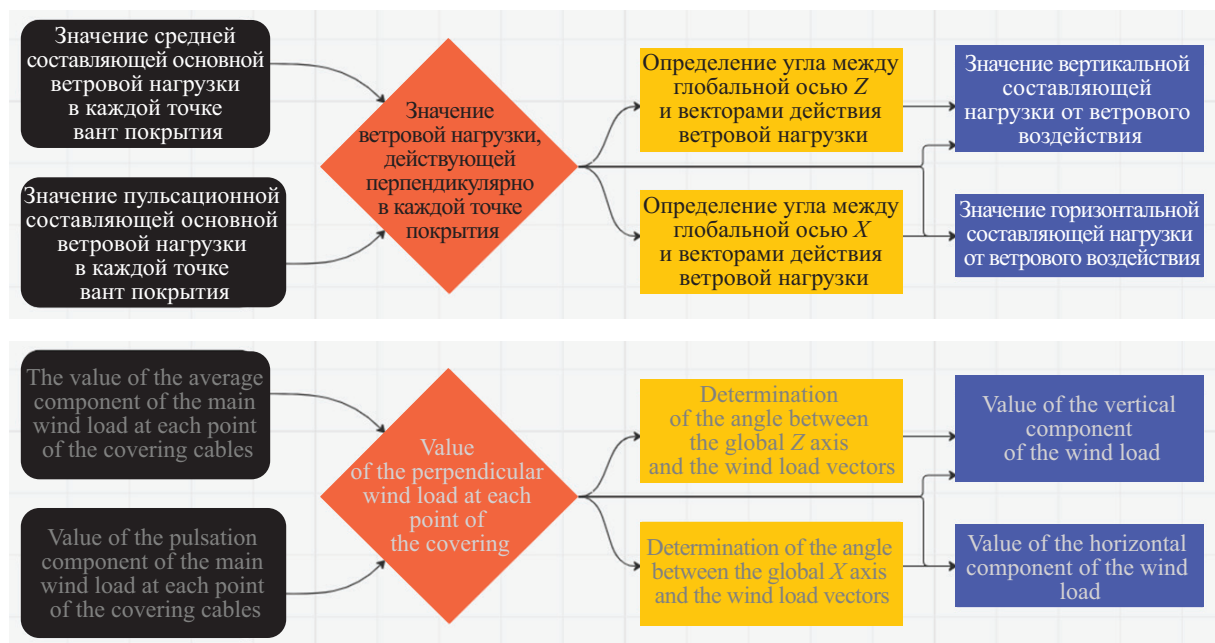


Рис. 15. Блок-схема скрипта Grasshopper, раскладывающего нормальный к грузовым площадкам вектор ветровой нагрузки на X и Z составляющие

Fig. 15. Block diagram of the Grasshopper script that decomposes the wind load vector normal to the loading area into X and Z components

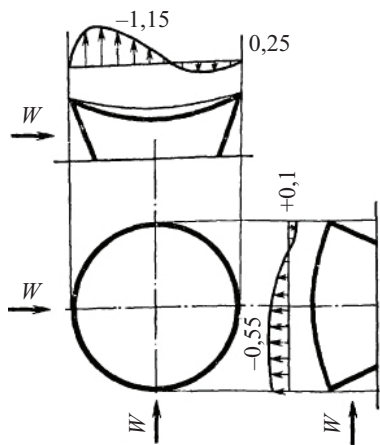


Рис. 16. Аэродинамический коэффициент c при покрытии
Fig. 16. Aerodynamic coefficient c at covering

Данные значения нагрузок были экспортированы в формате .xlsx, включая информацию об амплитуде изменения нагрузки на каждой ванте. Эти данные затем импортированы в ПК Лира Софт, где выполнено разложение вектора действия ветровой нагрузки на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 24, 25).

В ходе сбора постоянных и длительных нагрузок не учитывались архитектурные решения, такие как расположение плит перекрытия, колонн, лестниц, стен и перегородок, расположение которых было условным. Кроме того, нагрузка от несущих стен и перегородок не была учтена. Для поддержки вантовой сети покрытия использовано опорное кольцо из металлического профиля, которое передавало нагрузку на фундамент через распорные колонны. В работе выделены несущие конструкции, относящиеся к области исследования (рис. 1), а так-

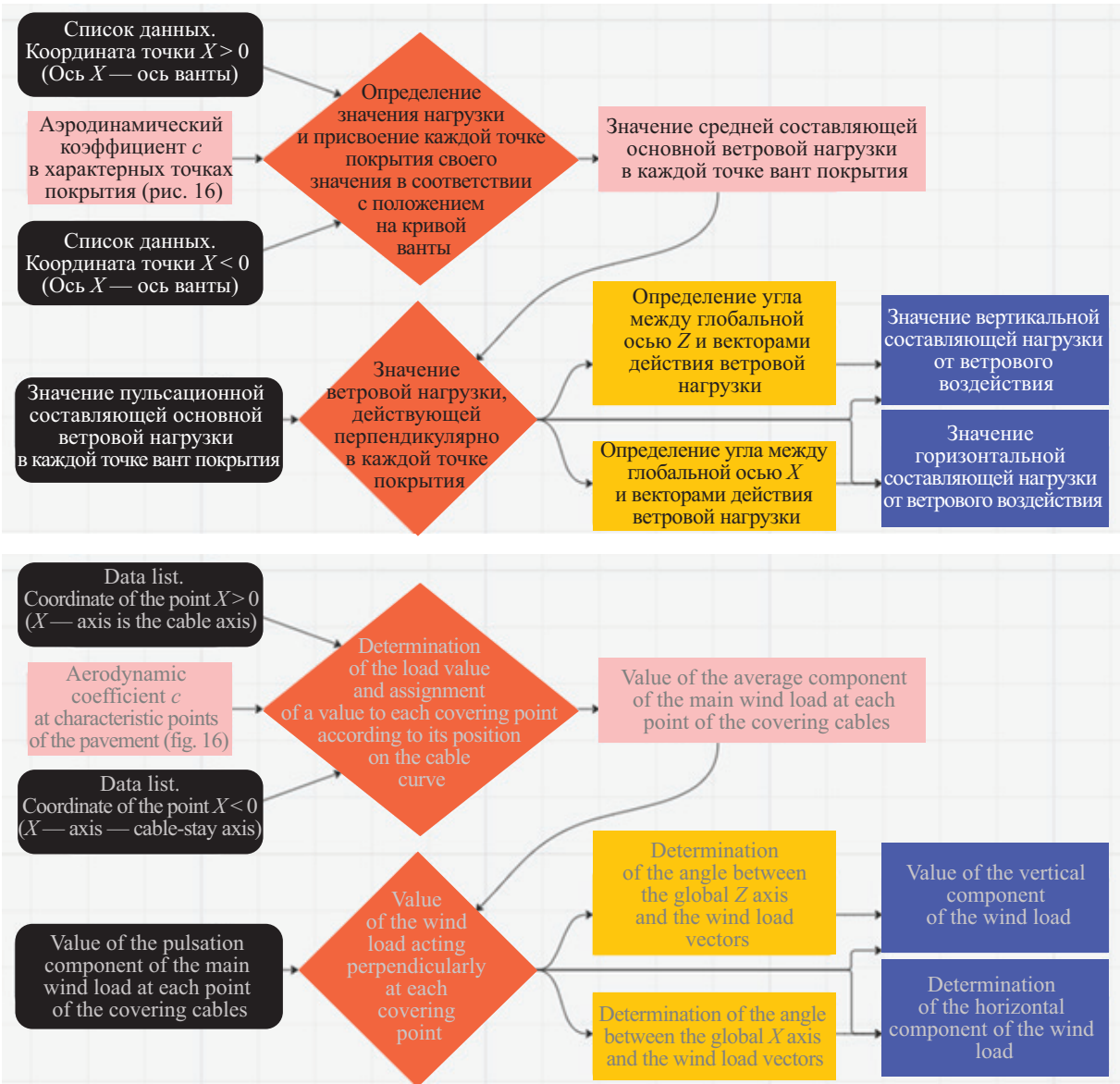


Рис. 17. Блок-схема скрипта Grasshopper для определения давления ветра, действующего параллельно несущим вантам
Fig. 17. Block diagram of the Grasshopper script for determining the wind pressure acting parallel to the load-bearing cables

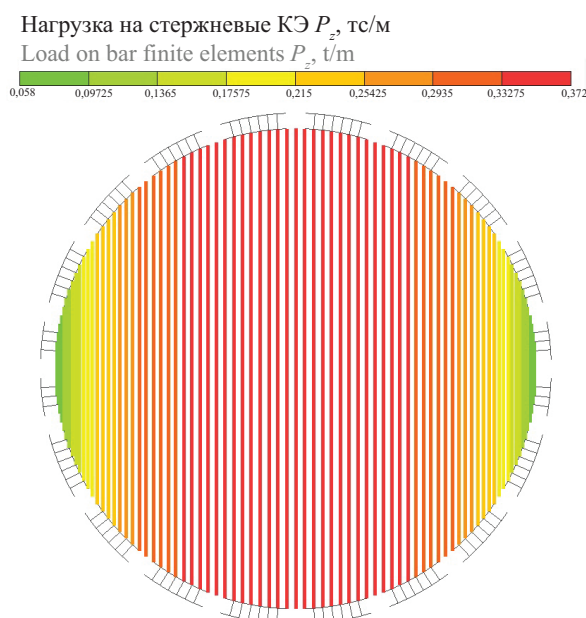


Рис. 18. 1-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 18. Option 1. Normative snow load on the covering

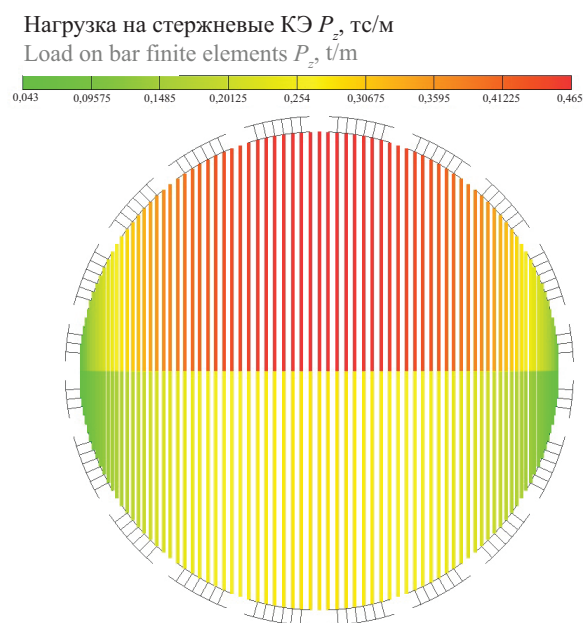


Рис. 19. 2-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 19. Option 2. Normative snow load on the covering

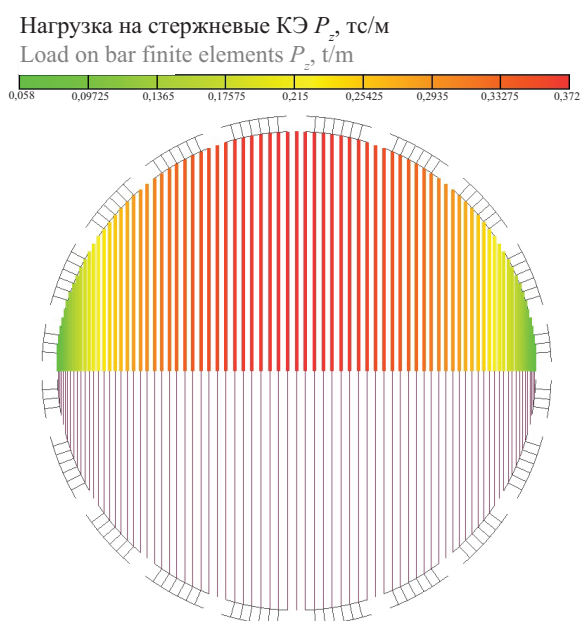


Рис. 20. 3-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 20. Option 3. Normative snow load on the covering

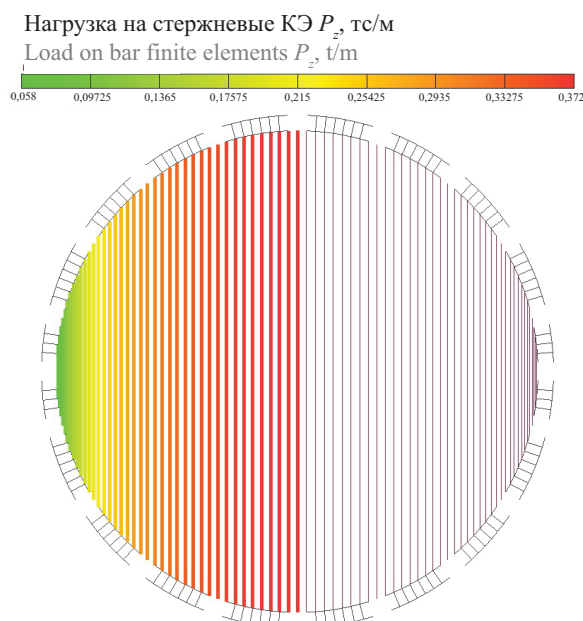


Рис. 21. 4-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 21. Option 4. Normative snow load on the covering

же не относящиеся к ней конструкции, выделенные серым цветом, которые были частично учтены при построении расчетной схемы для учета пространственной работы каркаса. Подробное описание сбора нагрузок представлено в главе 4 [25]. Так как задача расчета вант является геометрически нелинейной, таблицы РСН и РСУ использовать невозможно, поэтому была создана история загрузжений (рис. 26).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования способов применения параметрического программирования выполнен сбор нагрузок на расчетную конечно-элементную схему здания велодрома с покрытием двойкой кривизны по ортогональной вантовой сети.

Определены 4 типа снеговой нагрузки и 2 типа ветровой нагрузки. Использование Grasshopper позволило уйти от упрощения и интерполяции как ве-

Табл. 1. Значение ветровых нагрузок на покрытие, ветер по X

Table 1. Value of wind loads on the covering, wind along X

Точки и сечение Points and cross- sections	Средняя составляющая W_m , т/м ² Average component W_m , t/m ²	Пульсационная составляющая W_p , т/м ² Ripple component W_p , t/m ²	Основное значение W , т/м ² Basic meaning W , t/m ²	Пиковое значение W_+ , т/м ² Peak value W_+ , t/m ²
Точка A Point A	0,009	0,019	0,028	0,012
Сечение B–B Section B–B	–0,014	–0,019	–0,033	–0,018
Точка C Point C	0	0	0	0

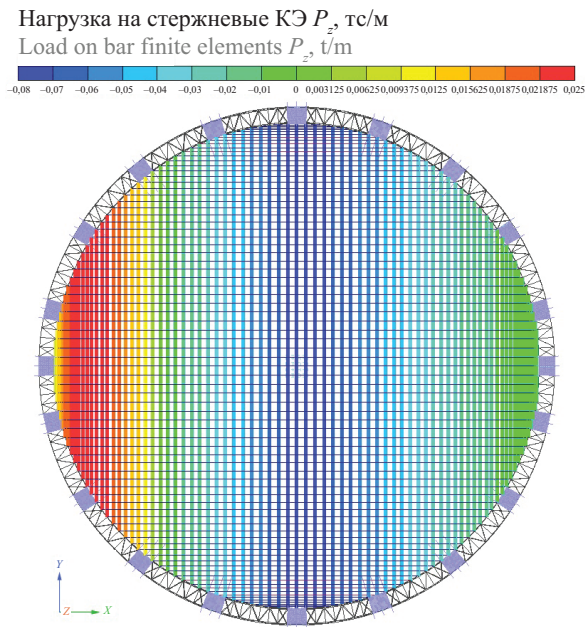


Рис. 22. Вертикальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер по направлению X)

Fig. 22. Vertical component of the main wind load (wind in X direction)

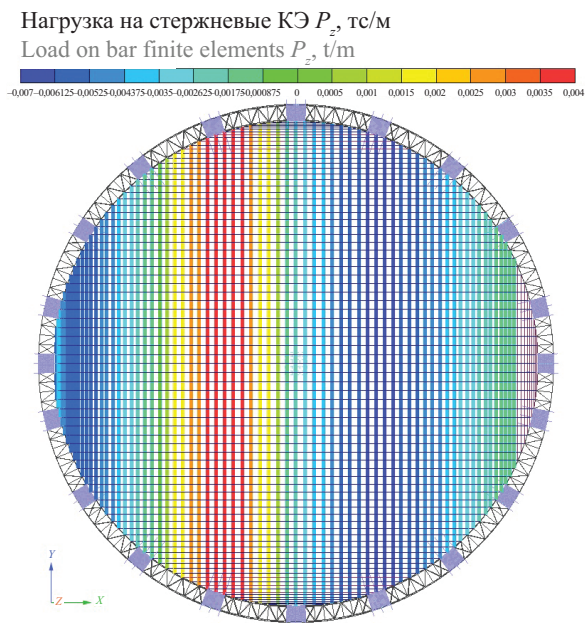


Рис. 23. Горизонтальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер по направлению X)

Fig. 23. Horizontal component of the main wind load (wind in X direction)

Табл. 2. Значение ветровых нагрузок на покрытие, ветер по Y

Table 2. The value of wind loads on the covering, wind along Y

Точки и сечение Points and cross- sections	Средняя составляющая W_m , т/м ² Average component W_m , t/m ²	Пульсационная составляющая W_p , т/м ² Ripple component W_p , t/m ²	Основное значение W , т/м ² Basic meaning W , t/m ²	Пиковое значение W_+ , т/м ² Peak value W_+ , t/m ²
Точка A Point A	0,013	0,019	0,032	0,017
Сечение B–B Section B–B	–0,023	–0,019	–0,042	–0,026
Точка C Point C	–0,058	–0,019	–0,077	–0,069

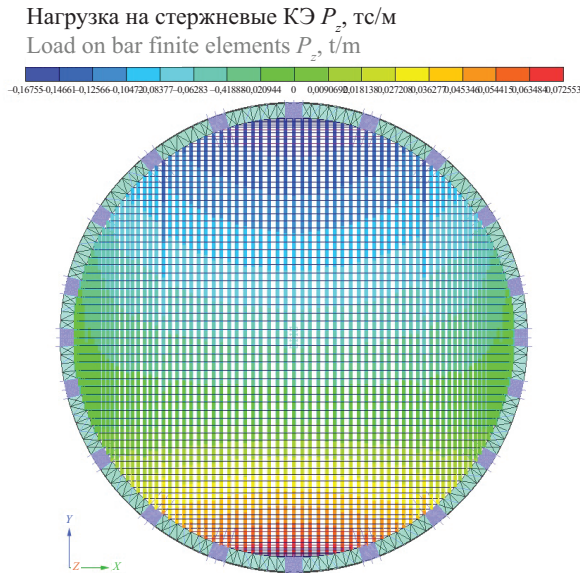


Рис. 24. Вертикальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер против направления по Y)

Fig. 24. Vertical component of the main wind load (wind against the Y direction)

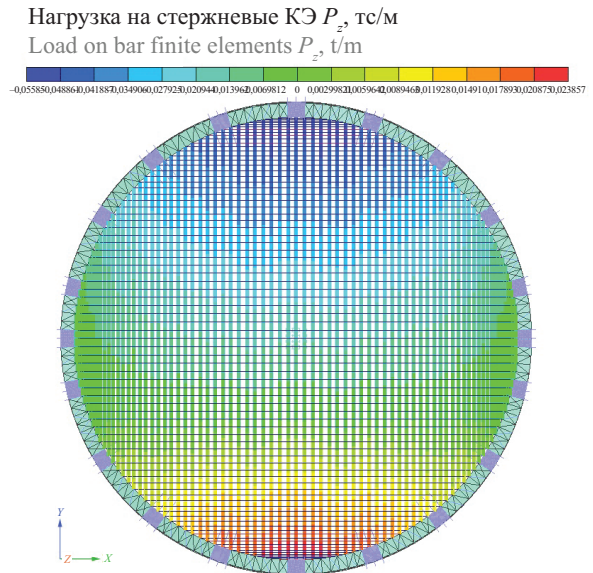


Рис. 25. Горизонтальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер против направления по Y)

Fig. 25. Horizontal component of the main wind load (wind against the Y direction)

1. Собственный вес
2. Давление грунта (нормативная)
3. Нагрузка от веса кровли по вантам (нормативная)
4. Нагрузка от веса кровли опорного кольца (нормативная)
5. Нагрузка от веса конструкции пола опорного кольца (нормативная)
6. Нагрузка от веса витражной системы (нормативная)
7. Нагрузка от веса пола по ЖБ перекрытию (нормативная)
8. Полезная нагрузка - пост. (нормативная)
9. Полезная нагрузка кратковрем. (нормативная)
10. Снеговая нагрузка по СП - Вариант 1 (нормативная)
11. Снеговая нагрузка по СП - Вариант 2 (нормативная)
12. Снеговая нагрузка - Вариант 3 (нормативная)
13. Снеговая нагрузка - Вариант 4 (нормативная)
14. Основная ветровая нагрузка, ветер X (нормативная)
15. Основная ветровая нагрузка, ветер Y (нормативная)

Рис. 26. Список нагрузок

Fig. 26. Load list

1. Self weight
2. Earth pressure (normative)
3. Load from the weight of the roof by shrouds (normative)
4. Load from the weight of the roof support ring (normative)
5. Load from the weight of the support ring floor structure (normative)
6. Load from the weight of the stained glass system (normative)
7. Load from the weight of the floor on the concrete floor (normative)
8. Payload - constant (normative)
9. Payload short-term (normative)
10. Snow load according to the Code of Rules - Option 1 (normative)
11. Snow load according to SP - Option 2 (normative)
12. Snow load Option 3 (normative)
13. Snow load Option 4 (normative)
14. Main wind load, wind X (normative)
15. Main wind load, wind U (normative)

личины давления на 1 м^2 , так и значений грузовых площадей в каждой точке вантовой сети от действия снега и ветра в нескольких вариантах воздействия. Такой подход в совокупности с результатами аэродинамических испытаний и автоматизированной передачи данных в расчетные комплексы позволит более точно определять НДС сложных покрытий, а также уйти от перерасчета и переназначения сложных неравномерно распределенных линейных

и нелинейных нагрузок в расчетных схемах при изменении исходных данных с экономией трудовых и временных затрат на контроль этих процессов.

В качестве примера оптимизации временных затрат можно привести пример применения одного и того же фрагмента кода в качестве исходных данных для определения значений трех видов загружений в 3800 точках покрытия с учетом нелинейных зон распределения коэффициентов этих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stavric M., Marina O. Parametric modeling for advanced architecture // International Journal of Applied Mathematics and Informatics. 2011. Vol. 5. Issue 1. Pp. 9–16.
2. Danhaive R., Mueller T. Combining parametric modeling and interactive optimization for high-performance and creative structural design // International As-

sociation for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium. 2015.

3. Kyratzi S., Azariadis P. Integrated design intent of 3D parametric models // Computer-Aided Design. 2022. Vol. 146. P. 103198. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103198

4. Салех М. Особенности разработки уникальных архитектурных решений с использованием цифровых методов на основе визуального программирования // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 1. С. 54–59. DOI: 10.34031/2618-7183-2022-5-1-54-59. EDN NOYMKD.

5. Jovanovic D., Radovic L. Parametric modelling in architecture // The 5th international conference mechanical engineering in XXI century. 2020. Pp. 347–352.

6. Kalkan E., Okur F., Altunışık A. Applications and usability of parametric modeling // Journal of Construction Engineering, Management & Innovation. 2018. Vol. 1. Issue 3. DOI: 10.31462/jcemi.2018.03139146

7. Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice // Automation in Construction. 2008. Vol. 17. Issue 4. Pp. 439–449. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.08.003

8. Schling E., Barthel R. Šuchov's bent networks: The impact of network curvature on Šuchov's gridshell designs // Structures. 2021. Vol. 29. Pp. 14961506. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.021

9. Gusevs J., Serdjus D., Artebjakina G.I., Afanasjeva E.A., Goremikins V. Behaviour of load-carrying members of velodromes' long-span steel roof // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 65. Issue 05. Pp. 3–16. DOI: 10.5862/MCE.65.1

10. Abramczyk J., Chrzanowska K. Complex building forms roofed with transformed shell units and defined by saddle surfaces // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 24. Pp. 8942. DOI: 10.3390/ma15248942

11. Lai M., Eugster S.R., Reccia E., Spagnuolo M., Cazzani A. Corrugated shells: An algorithm for generating double-curvature geometric surfaces for structural analysis // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 173. P. 109019. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109019

12. Bleicher A., Behnke R., Schlaich M. Double Curvature for Volkswagen // IASS Symposium 2017 — Interfaces: architecture.engineering.science. 2017.

13. Аверин А. Расчетные модели гибких нитей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 9 (741). С. 5–19. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19. EDN YFKYTO.

14. Timchenko R., Popov S., Krishko D., Rajeshwar G., Aniskin A. Cable-stayed coverings for large-span public buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 280. P. 07008. DOI: 10.1051/e3s-conf/202128007008

15. Нугуманова А.Д., Кашеварова Г.Г. Расчет вантовых конструкций на примере оттяжек мачты // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 3. С. 103–110. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.3.07. EDN UNJOKX.

16. Коваленко Н.И., Разин С.Н. Математическое моделирование взаимодействия гибкой нити, моделирующей зажатую пряжу, с цилиндрической

поверхностью при наличии внешней распределенной нагрузки // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2015. № 6 (360). С. 205–209. EDN VHKSXP.

17. Кужахметова Э.Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндрично-плитно-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 95–110. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110. EDN RUOFTA.

18. Кужахметова Э. Расчет вант с учетом геометрической и физической нелинейности // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 252–266. EDN BBJSCF.

19. Kim N.-I., Thai S., Lee J. Nonlinear elastoplastic analysis of slack and taut cable structures // Engineering with Computers. 2016. Vol. 32. Issue 4. Pp. 615–627. DOI: 10.1007/s00366-016-0440-7

20. Chen Y., Meng F., Gong X. Parametric modeling and comparative finite element analysis of spiral triangular strand and simple straight strand // Advances in Engineering Software. 2015. Vol. 90. Pp. 63–75. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.06.011

21. El-Dardiry E., Hamdy G., Fayed N., Konswaah M.R. Optimum design of wide span cable-stayed roof structures // International Journal of Scientific and Engineering Research. 2018. Vol. 9. Issue 5.

22. Peng Y., Zhao W., Zhou J. Reliability analysis of a large curved-roof structure considering wind and snow coupled effects // Disaster Prevention and Resilience. 2022. Vol. 1. Issue 4. P. 8. DOI: 10.20517/dpr.2022.02

23. Попов Н., Лебедева Д., Богачев Д., Березин М.М. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 71–76. EDN XISJCT.

24. Сафиуллин И.И. Исследование ветровых воздействий на ЖК «Лазурные небеса» // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (30) С. 413–417. EDN TSMPMD.

25. Дагаев В. Расчет большепролетного сооружения с вантовым покрытием двоякой кривизны : выпускная квалификационная работа специалиста. СПб., 2022. С. 1–255. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2022/vr/vr22-1775.

26. Дагаев В.А., Школяр Ф.С. Построение конечно-элементной схемы вантового покрытия двоякой кривизны с помощью Grasshopper // Неделя науки ИСИ : сб. мат. Всеросс. конф. 2022. С. 322–325. EDN XKVFKM.

27. Бабаева К. Расчетные нагрузки для основных типов висячих покрытий. Научно-техническая информация Госстроя СССР. 1965. № 10. С. 26.

Поступила в редакцию 11 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 28 августа 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владислав Алексеевич Дагаев** — инженер, подразделение «Конструкции, проектирование»; **Спектрум-Холдинг**; 199178, г. Санкт-Петербург, 7-я линия Васильевского острова, д. 76, лит. А; РИНЦ ID: 951859; dagaev@spgr.ru;

Георгий Максимович Пурвин — инженер, подразделение «Конструкции, проектирование»; **Спектрум-Холдинг**; 199178, г. Санкт-Петербург, 7-я линия Васильевского острова, д. 76, лит. А; purvin@spgr.ru;

Филипп Сергеевич Школяр — кандидат технических наук, старший преподаватель; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 69808774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkolyar.fs@gmail.com.

Вклад авторов:

Дагаев В.А. — идея, формирование концепции, построение математической модели, анализ результатов.

Пурвин Г.М. — доработка исходного текста статьи, научное редактирование.

Школяр Ф.С. — научное руководство, формирование структуры исследования, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Stavric M., Marina O. Parametric modeling for advanced architecture. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*. 2011; 5(1):9-16.
2. Danhaive R., Mueller T. Combining parametric modeling and interactive optimization for high-performance and creative structural design. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. 2015.
3. Kyratzi S., Azariadis P. Integrated design intent of 3D parametric models. *Computer-Aided Design*. 2022; 146:103198. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103198
4. Saleh M.S. Features of developing unique architectural solutions using digital methods based on visual programming. *Construction Materials and Products*. 2022; 5(1):54-59. DOI: 10.34031/2618-7183-2022-5-1-54-59. EDN NOYMKD. (rus.).
5. Jovanovic D., Radovic L. Parametric modeling in architecture. *The 5th international conference mechanical engineering in XXI century*. 2020; 347-352.
6. Kalkan E., Okur F., Altunışık A. Applications and usability of parametric modeling. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*. 2018; 1(3). DOI: 10.31462/jcemi.2018.03139146
7. Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice. *Automation in Construction*. 2008; 17(4):439-449. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.08.003
8. Schling E., Barthel R. Šuchov's bent networks: The impact of network curvature on Šuchov's grid-shell designs. *Structures*. 2021; 29:1496-1506. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.021
9. Gusevs J., Serdjuks D., Artebjakina G.I., Afanasjeva E.A., Goremikins V. Behaviour of load-carrying members of velodromes' long-span steel roof. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 65(05):3-16. DOI: 10.5862/MCE.65.1
10. Abramczyk J., Chrzanowska K. Complex building forms roofed with transformed shell units and defined by saddle surfaces. *Materials*. 2022; 15(24):8942. DOI: 10.3390/ma15248942
11. Lai M., Eugter S.R., Reccia E., Spagnuolo M., Cazzani A. Corrugated shells: An algorithm for generating double-curvature geometric surfaces for structural analysis. *Thin-Walled Structures*. 2022; 173:109019. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109019
12. Bleicher A., Behnke R., Schlaich M. Double curvature for Volkswagen. *IASS Symposium 2017 — Interfaces: architecture.engineering.science*. 2017.
13. Averin A.N. Calculation models of flexible threads. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 9(741):5-19. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19. EDN YFKYTO. (rus.).
14. Timchenko R., Popov S., Krishko D., Rajeshwar G., Aniskin A. Cable-stayed coverings for large-span public buildings. *E3S Web of Conferences*. 2021; 280:07008. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007008
15. Nugumanova A.D., Kashevarova G.G. Computation of cable-stayed constructions on the example of anchor stays. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2015; 3:103-110. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.3.07. EDN UNJOKX. (rus.).
16. Kovalenko N.I., Razin S.N. Computer simulation of a flexible string, modeling sandwiched strand, with the cylindrical surface when an external load distribution. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2015; 6(360):205-209. EDN VHSKSP. (rus.).

17. Kuzhakhmetova E.R. Stress-strain state cylinder-plate-cable-stayed roof buildings (structures) with various forms of external support contour. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(2):95-110. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110. EDN RUOFTA. (rus.).
18. Kuzhakhmetova, E. Calculation of cables taking into account geometric and physical nonlinearity. *KSTU News*. 2019; 55:252-266. EDN BBJSCF. (rus.).
19. Kim N.-I., Thai S., Lee J. Nonlinear elastoplastic analysis of slack and taut cable structures. *Engineering with Computers*. 2016; 32(4):615-627. DOI: 10.1007/s00366-016-0440-7
20. Chen Y., Meng F., Gong X. Parametric modeling and comparative finite element analysis of spiral triangular strand and simple straight strand. *Advances in Engineering Software*. 2015; 90:63-75. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.06.011
21. El-Dardiry E., Hamdy G., Fayed N., Konswoah M.R. Optimum design of wide span cable-stayed roof structures. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018; 9(5).
22. Peng Y., Zhao W., Zhou J. Reliability analysis of a large curved-roof structure considering wind and snow coupled effects. *Disaster Prevention and Resilience*. 2022; 1(4):8. DOI: 10.20517/dpr.2022.02
23. Popov N.A., Lebedeva I.V., Bogachev D.S., Berezin M.M. Impact of wind and snow loads on large-span roofs. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 12:71-76. EDN XISJCT. (rus.).
24. Safiullin I.I. Numerical modeling of wind effects on high-rise building “Lazurnie nebesa” (Kazan). *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2014; 4(30):413-417. EDN TSMPMD. (rus.).
25. Dagaev V. *Calculation of a large-span structure with a cable-stayed roof of double curvature*. St. Petersburg, 2022; 1-255. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2022/vr/vr22-1775 (rus.).
26. Dagaev V., Shkolyar F. Construction of a finite element scheme for a cable-stayed cover of double curvature using Grasshopper. *Nedelya Nauki ISI : collection of materials of the All-Russian Conference*. 2022; 322-325. EDN XKVFKM. (rus.).
27. Babaeva K. *Design loads for the main types of hanging roofs*. Scientific and technical information of the USSR State Construction Committee. 1965; 10:26. (rus.).

Received June 11, 2023.

Adopted in revised form on August 13, 2023.

Approved for publication on August 28, 2023.

B I O N O T E S : **Vladislav A. Dagaev** — engineer, “Structures, Design” division; **Spectrum-Holding**; lit. A 76, 7th line of Vasilevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; ID RSCI: 951859; dagaev@spgr.ru;

Georgii M. Purvin — engineer, “Structures, Design” division; **Spectrum-Holding**; lit. A 76, 7th line of Vasilevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; purvin@spgr.ru;

Filipp S. Shkolyar — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 69808774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkolyar.fs@gmail.com.

Contribution of the authors:

Vladislav A. Dagaev — idea, concept formation, mathematical model construction, analysis of results.

Georgii M. Purvin — finalization of the original text of the article and its scientific editing.

Filipp S. Shkolyar — scientific guidance, the formation of the structure of the study, the final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 2.1.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1731-1744

Оптимальные размеры стальных сварных балок с шарнирными опорными узлами

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время возрастают требования к надежности и долговечности металлоконструкций, а также их экономической целесообразности. Учитывая сложность анализа множества факторов, влияющих на прочность, устойчивость и долговечность сварных стальных балок, предлагается новый подход к определению оптимальных размеров, основанный на энергетической теории прочности, с выводом новых коэффициентов, для упрощения подбора сечения балок.

Материалы и методы. Проведен анализ с использованием энергетической теории прочности, с применением которой рассчитана потенциальная энергия упругой деформации стальных сварных балок. Для установления оптимальных размеров балок вычислена первая производная потенциальной энергии упругой деформации по высоте балки, полученный в итоге результат позволил составить отношение высоты и толщины стенки балки к ширине и толщине пояса балки. Это отношение обозначено коэффициентом k_{opt} , при помощи которого предложена методика подбора оптимального сечения балки.

Результаты. Выведены формулы, позволяющие быстро и с наименьшим весом подобрать оптимальное сечение балки с использованием коэффициента k_{opt} и гибкости стенки. Путем итерационного расчета определены оптимальные значения коэффициента k_{opt} и гибкости при различных нагрузках и пролетах балок. Выведены формулы для установления k_{opt} , зависящие от распределенной нагрузки q , приведены графики и таблицы для определения оптимальной гибкости стенки балки и коэффициента k_{opt} при заданных параметрах.

Выводы. Сформулирован метод подбора оптимальных размеров стальных сварных балок, опирающийся на энергетическую теорию прочности и введение коэффициента k_{opt} . Разработанные формулы и выполненный итерационный расчет, результаты которого представлены в таблицах, позволяют обеспечить быстрый и металлоемкий подбор оптимального сечения сварных балок при различных нагрузках и пролетах, что значительно упрощает процесс проектирования и повышает эффективность использования материалов и конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптимизация сварных конструкций, сварные балки, оптимальная высота балки, методы оптимизации сварных балок, оптимальные размеры балок, оптимальная ширина балки, балки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бажин Г.М. Оптимальные размеры стальных сварных балок с шарнирными опорными узлами // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1731–1744. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1731-1744

Автор, ответственный за переписку: Григорий Михайлович Бажин, gbajin@mail.ru.

Optimal dimensions of steel welded beams with hinged support units

Grigoriy M. Bazhin*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. At the present time, the requirements to reliability and durability of steel structures, as well as their economic feasibility, are increasing. Considering the complexity of analyzing multiple factors influencing the strength, stability and durability of steel welded beams, a new approach to the determination of optimal dimensions based on maximum-strain-energy theory is proposed, with the derivation of new coefficients to simplify the selection of beam cross-sections.

Materials and methods. The research involved an analysis using maximum-strain-energy theory, with the application of which the potential energy of elastic deformation of steel welded beams was calculated. To determine the optimal dimensions of beams, the first derivative of the potential energy of elastic deformation over the height of the beam was calculated to establish the optimal dimensions of the beams, and the obtained result made it possible to compute the ratio of the height and thickness of the beam web to the width and thickness of the beam girdle. This ratio is denoted by the coefficient k_{opt} by means of which a methodology for selecting the optimal beam cross-section is proposed.

Results. Formulas were derived which allow to select the optimal beam section quickly and with the least weight using the coefficient k_{opt} and web flexibility. Iterative calculations were used to determine the optimal values of the coefficient k_{opt} and flexibility under different loads and beam spans. As a result of the research, formulas for determining k_{opt} were derived,

depending on the distributed load q , along with graphs and tables for determining the optimal web flexibility and the k_{opt} coefficient for the given parameters.

Conclusions. Based on the conducted analysis, a method of selecting the optimal dimensions of steel welded beams was formulated, based on maximum-strain-energy theory and the introduction of the k_{opt} coefficient. The developed formulas and iterative calculations, the results of which are presented in tables, make it possible to provide a quick and metal-intensive selection of the optimal cross-section of welded beams under different loads and spans, significantly simplifying the design process and increases the efficiency of the use of materials and structures.

KEYWORDS: optimization of welded structures, welded beams, optimal beam height, optimization methods for welded beams, optimal beam dimensions, optimal beam width, beams

FOR CITATION: Bazhin G.M. Optimal dimensions of steel welded beams with hinged support units. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1731-1744. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1731-1744 (rus.).

Corresponding author: Grigoriy M. Bazhin, gbajin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Определение оптимальных размеров балок является важным этапом проектирования, ведь это напрямую влияет на прочность, устойчивость и экономичность конструкции. Выбор размеров зависит от множества факторов, каждый из которых оказывает воздействие на процесс проектирования.

Нагрузка на балку и ее тип (статическая, динамическая, ударная) влияют на требования к прочности и жесткости балки [1]. Выбор размеров балки должен основываться на обеспечении необходимой прочности и жесткости при допустимых деформациях. Более высокие нагрузки требуют более мощных балок, что может привести к увеличению их размеров.

Форма и габариты сооружения обуславливают геометрические ограничения на размеры балок. В пространственных конструкциях, например, балки могут быть подвержены дополнительным изгибающим или крутящим моментам, что может потребовать увеличения размеров балок для обеспечения устойчивости конструкции.

Материал балки и сварного соединения определяет характеристики прочности и жесткости, а также сопротивление коррозии и усталости. Разные стали имеют разные характеристики, которые могут повлиять на оптимальные размеры балок. Также важно учитывать свойства монтажного сборочного сварного соединения в случае, если укрупненная сборка будет вестись на сварке, так как оно может оказаться самым слабым звеном в конструкции.

Условия эксплуатации и воздействие окружающей среды (температура, влажность, химическая агрессия, сейсмическая активность) также влияют на выбор размеров стальных сварных балок. Например, в условиях повышенной коррозионной активности может потребоваться увеличение толщины стенок балки для обеспечения долговечности конструкции. В зонах сейсмической активности размеры и конфигурация балок могут быть изменены для обеспечения лучшей адаптации к сейсмическим нагрузкам.

Стандарты и нормы проектирования устанавливают минимальные требования к размерам и прочности стальных сварных балок. Они включа-

ют рекомендации по выбору материалов, методов проектирования и расчета, а также предельных допусков для различных видов нагрузок. Соблюдение стандартов и норм проектирования является обязательным условием для обеспечения безопасности и долговечности конструкций.

Для оптимизации сварных балок наиболее эффективным будет использование современных методов численного моделирования конструкций [2] на основе метода конечных элементов (МКЭ). Метод конечных элементов служит мощным численным инструментом для анализа и проектирования инженерных конструкций, включая сварные балки. Он позволяет проводить детальный анализ напряжений, деформаций и других параметров конструкции, что может быть применено для оптимизации размеров балок.

Для этого необходимо создать трехмерную геометрическую модель балки (рис. 1), включая ее форму и размеры [3, 4], а также детали сварных соединений с помощью специализированных программ (например, ANSYS, ABAQUS, SolidWorks Simulation). Разбить модель на конечные элементы (тетраэдры, гексаэдры), которые образуют сетку. Количество и размер элементов влияют на точность и скорость расчета. Задать свойства материала балки и граничные условия (модуль упругости, предел прочности, коэффициент Пуассона и т.д.) и нагрузки, действующие на балку [5–8].

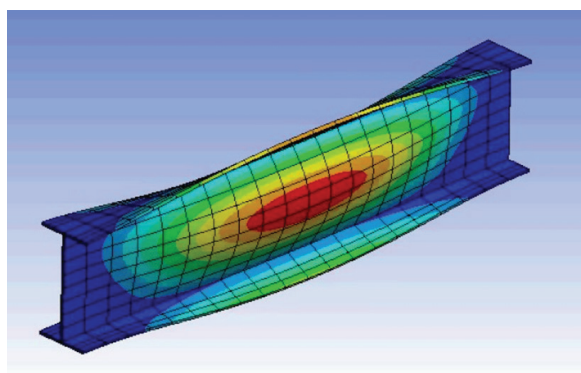


Рис. 1. Конечно-элементная модель сварной двутавровой балки

Fig. 1. Finite element model of the welded I-beam

На основе полученных результатов проводится анализ прочности, жесткости и устойчивости балки [9]. Затем с использованием оптимизационных алгоритмов или итерационных методов подбираются оптимальные размеры балки, которые обеспечивают необходимые характеристики при минимальном весе и затратах на материалы [10, 11].

Один из наиболее подходящих оптимизационных алгоритмов — метод последовательной аппроксимации. Он предполагает поэтапное приближение к оптимальному решению путем уточнения геометрии балки и параметров конструкции на каждом шаге. Примером может служить метод наименьших квадратов, который использует численные методы для определения оптимальных параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические исследования

Оптимальные размеры сечения сварной балки можно установить, понимая, что потенциальная энергия упругой деформации балки U_{el} будет равна нулю при полном совершении работы сил, приводящих балку к деформации. Взяв первую производную потенциальной энергии по высоте балки и приравняв ее к нулю, можно определить оптимальную высоту сечения балки из условия энергетической теории прочности.

Если предположить, что балка шарнирно опирается по краям и загружена равномерно распределенной нагрузкой, то потенциальную энергию упругой деформации такой балки можно записать так:

$$U_{el} = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EJ} dx. \quad (1)$$

Подставив в это выражение изгибающий момент, найденный в какой-то точке x :

$$M = \frac{ql}{2}x - \frac{qx^2}{2},$$

где x — координата точки, где определяется изгибающий момент, и проинтегрировав формулу (1), получим окончательное выражение потенциальной энергии упругой деформации:

$$U_{el} = \frac{q^2 l^5}{240EJ}. \quad (2)$$

Момент инерции всей балки в общем виде можно записать следующим образом:

$$J_x = \frac{t_w h_w^3}{12} + \frac{b t_f^3}{6} + \frac{h_w^2 b t_f}{2},$$

где t_w — толщина стенки; h_w — высота стенки; b — ширина пояса; t_f — толщина полки.

Подставляя это выражение в (2), взяв от него первую производную по высоте и приравняв ее нулю, получим:

$$\frac{d}{dh} U_{el} = - \frac{q^2 l^5 \left(\frac{t_w h_w^2}{4} + b t_f h_w \right)}{240E \left(\frac{t_w^3 h_w^3}{12} + \frac{b h_w^2 t_f}{2} + \frac{b t_f^3}{6} \right)^2} = 0$$

и

$$h_w = - \frac{4b t_f}{t_w}.$$

Введя коэффициент пропорциональности k_{opt} и взяв полученное выражение по модулю, его можно записать так:

$$k_{opt} = \frac{h_w t_w}{b t_f} = \frac{A_w}{A_f},$$

где множитель 4 представлен как k_{opt} — коэффициент пропорциональности балки; A_w — площадь поперечного сечения стенки; A_f — площадь поперечного сечения пояса.

Другим методом определения оптимальных размеров балок является сравнение с экспериментальными данными и аналогичными конструкциями. Значения k_{opt} , применяемого у прокатных профилей, приведены в табл. 1.

В работе [12] установлено, что для прокатных двутавровых балок k_{opt} составляет примерно 1,94. При этом для того, чтобы корректно задать размеры листов составной балки, необходимо ввести коэффициент пропорциональности геометрического сечения δ_{opt} , который находится как отношение высоты балки к ее ширине:

$$\delta_{opt} = \frac{h}{b}. \quad (3)$$

Зная k_{opt} и δ_{opt} , можно установить предварительные генеральные размеры сварной балки, приближенные к оптимальным.

Численные исследования

Как видно из каталога прокатных профилей (табл. 1), коэффициент δ_{opt} условно равномерно растет с увеличением высоты сечения балки. Так, при высоте балки от ~ 500 до 600 среднее значение $\delta_{opt} = 2,51$; при высоте от ~ 700 до 800 $\delta_{opt} = 2,75$; при высоте от ~ 900 до 1000 $\delta_{opt} = 3,06$. Если сделать допущение, что рост δ_{opt} происходит линейно, то, воспользовавшись методом наименьших квадратов, можно получить уравнение вида:

$$\delta_{opt} = ah + d.$$

Табл. 1. Коэффициенты k_{opt} , δ_{opt} для ГОСТ 26020–83
 Table 1. Coefficients k_{opt} , δ_{opt} for GOST 26020–83

Параметры Parameters	δ_{opt}	k_{opt}	b	t_f	h_w	t_w	h
50B1 / 50B1	2,46	1,804	200	12	468	8,8	492
50B2 / 50B2	2,48	1,63	200	14	468	9,2	496
55B1 / 55B1	2,468	1,737	220	13,5	516	9,5	543
55B2 / 55B2	2,486	1,604	220	15,5	516	10	547
60B1 / 60B1	2,578	1,747	230	15,5	562	10,5	593
60B2 / 60B2	2,596	1,632	230	17,5	562	11	597
70B1 / 70B1	2,658	2,058	260	15,5	660	12	691
70B2 / 70B2	2,681	1,811	260	18,5	660	12,5	697
80B1 / 80B1	2,825	2,243	280	17	757	13,5	791
80B2 / 80B2	2,85	1,946	280	20,5	757	14	798
90B1 / 90B1	2,977	2,414	300	18,5	856	15	893
90B2 / 90B2	3	2,114	300	22	856	15,5	900
100B1 / 100B1	3,094	2,357	320	21	948	16	990
100B2 / 100B2	3,119	2,121	320	25	948	17	998
100B3 / 100B3	3,144	1,951	320	29	948	18	1006
100B4 / 100B4	3,166	1,899	320	32,5	948	19,5	1013

Для этого сначала определим среднее значение h_{cp} и среднее значение δ_{opt_cp} , воспользовавшись табл. 1:

$$h_{cp} = \frac{492 + 496 + 543 + \dots + 1013}{16} = 752,8;$$

$$\delta_{opt_cp} = \frac{2,46 + 2,48 + 2,468 \dots + 3,166}{16} \approx 2,78.$$

Теперь найдем значения a и b , используя формулы:

$$a = \sum \frac{(h_i - h_{cp})(\delta_{opt_i} - \delta_{opt_cp})}{(h_i - h_{cp})^2};$$

$$d = \delta_{opt_cp} - ah_{cp},$$

отсюда $a = 0,00136$, $d = 1,762$.

Тогда уравнение линейной зависимости δ_{opt} от высоты балки в мм примет вид:

$$\delta_{opt} = 0,00136 h + 1,76. \tag{4}$$

Если при определении коэффициента пропорциональности балки заменить h_w на h , где h — пол-

ная высота балки в мм, то формула для определения k_{opt} примет вид:

$$k_{opt} = \delta_{opt} \frac{t_w}{t_f}, \tag{5}$$

где t_w — толщина стенки; t_f — толщина полки.
 Из практики толщину стенки выбирают в зависимости от пролета (табл. 2). Высоту балки можно предварительно принять как $1/8 \sim 1/10$ от пролета или определить по формуле, предложенной В.М. Вахуркиным [13], задавшись гибкостью стенки $\lambda_w = 120 - 150$:

$$h_{opt} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \lambda_w W}.$$

Тогда, воспользовавшись выражениями (3) и (5), преобразовав их, можно легко рассчитать ширину и толщину пояса:

$$b = \frac{h}{\delta_{opt}}; \tag{6}$$

$$t_f = t_w \frac{\delta_{opt}}{k_{opt}}. \tag{7}$$

Сравнительные расчеты (табл. 3) показывают, что данный метод позволяет с наименьшими трудозатратами для инженера подбирать оптимальные сечения сварной балки с первого раза, удовлетворяющие условию прочности.

Из предварительных проверочных расчетов (табл. 3) видно, что в зависимости от изменения изгибающего момента меняется оптимальная гибкость стенки $\lambda_{w,opt}$, а также значение k_{opt} . Для инженера-конструктора это означает, что с изменением пролета балки и нагрузки на балку должны меняться оптимальные значения гибкости стенки $\lambda_{w,opt}$ и k_{opt} .

В табл. 4 приведены проверочные расчеты типовых шарнирно-опертых сварных балок, выполненные итерационным методом подбора оптимальных значений $\lambda_{w,opt}$ и k_{opt} для пролета 18 м и различных расчетных нагрузок, при которых сечение будет иметь наименьший вес.

Как видно из табл. 4, с увеличением нагрузки и, как следствие, изгибающего момента, значения коэффициентов k_{opt} уменьшаются. На рис. 2 приведен график изменения k_{opt} при значениях нагрузок от 10 до 180 кН/м, с введенными данными с шагом 1 кН/мп.

Если выполнить сглаживание графика функции $k_{opt}(q)$, можно найти уравнение сглаженной функ-

Табл. 2. Толщина стенки в зависимости от пролета
 Table 2. Web thickness depending on the span

L , м / m	12	14	18
t_w , мм / mm	8–10	10–12	12–16

Табл. 3. Пример подбора сечения сварной балки, при различных пролетах

Table 3. Example of selection of the welded beam cross-section, with different spans

Пролет L , м Beam span L , m	14	16	18
$\lambda_{w,opt}$	148	149	138
q , кН/м / kN/m	149		
M_x , кНм / kNm	3650,5	4768	6035
R_y , кН/см ² / kN/cm ²	23		
γ_c	0,9		
$W_{np} = \frac{M_x}{R_y \gamma_c}$, см ³ $W_{nec} = \frac{M_x}{R_y \gamma_c}$, см ³	17 635	23 033	29 152
$h_{opt} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \lambda_w W}$, см / cm	157,6	172,6	182,05
t_w , мм / mm	10	12	12
δ_{opt}	3,9	4,1	4,24
k_{opt}	1,78	1,87	1,62
$t_f = t_w \frac{\delta_{opt}}{k_{opt}}$	21,9	26,4	31,3
t_f с учетом ГОСТ t_f taking into account GOST	22	25	30
$h_w = h_{opt} - 2t_f$	153,2	167,6	175,79
h_w с учетом ГОСТ h_w taking into account GOST	154	168	177
$b = \frac{h}{\delta_{opt}}$, мм / mm	400,37	416,52	429,98
b с учетом ГОСТ b taking into account GOST	420	420	450
J_x , см ⁴ / cm ⁴	1 400 109,1	2 061 880,3	2 669 433,3
$\frac{M_x}{J_x R_y \gamma_c} y < 1$	0,997	0,966	0,999
Площадь сечения балки A_b , см ² Beam cross-sectional area A_b , cm ²	338,8	426,6	482,4
Вес, т Weight, t	3,71	5,34	6,79

ции, которое позволит определять коэффициенты k_{opt} при любых значениях q .

Из графика (рис. 2) видно, что наилучшим образом функцию будет описывать полином 5-й степени, вида:

$$k_{opt}(q) = a_5 q^5 + a_4 q^4 + a_3 q^3 + a_2 q^2 + a_1 q + a_0,$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ — коэффициенты полинома, которые необходимо найти.

Воспользуемся полиномиальной регрессией для аппроксимации данных графика на рис. 2 с набором точек $q_1, k_{opt,1}; q_2, k_{opt,2}; \dots, q_n, k_{opt,n}$.

Для нахождения коэффициентов $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$, которые минимизируют сумму квадратов ошибок (SSE), используем метод наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} SSE &= \sum (k_{opt}(q_i) - k_{opt,i})^2 = \\ &= \sum_{i=1..n} [(a_5 q_i^5 + a_4 q_i^4 + a_3 q_i^3 + a_2 q_i^2 + \\ &+ a_1 q_i + a_0) - k_{opt,i}]^2. \end{aligned}$$

Табл. 4. Подбор оптимального сечения при $L = 18$ м

Table 4. Selection of the optimal cross-section at $L = 18$ m

q , кН/м kN/m	k_{opt}	$\lambda_{w,opt}$	Вес, т Weight, t	A , см ² cm ²	J_x , см ⁴ / cm ⁴	h_w	t_w	b_f	t_f	$\frac{M_x}{J_x R_y \gamma_c} y < 1$
40	2,64	123	3,29	234	447 268	111	1,2	36	1,4	0,995
50	2,83	150	3,66	260	645 547	128	1,2	38	1,4	0,991
55	2,5	137	3,87	275,2	707 814	128	1,2	38	1,6	0,997
60	2,25	130	4,11	291,6	783 828	129	1,2	38	1,8	0,992
65	2,04	121	4,32	306,8	847 077	129	1,2	38	2	0,998
70	2,35	145	4,41	313,2	996 077	141	1,2	40	1,8	0,994
75	2,12	133	4,62	328	1 058 453	140	1,2	40	2	0,998
80	2,18	144	4,74	336,4	1 182 066	147	1,2	40	2	0,999
85	2,21	148	4,92	349,2	1 301 993	151	1,2	42	2	0,989
90	2,11	140	5,15	366	1 397 776	151	1,2	42	2,2	0,978
95	2,14	143	5,22	370,8	1 482 417	155	1,2	42	2,2	0,999
100	1,75	126	5,49	390	1 518 859	150	1,	42	2,5	0,998
105	1,79	133	5,59	397,2	1 657 391	156	1,2	42	2,5	0,997
110	1,83	142	5,69	404,4	1 803 072	162	1,2	42	2,5	0,996
115	1,65	126	5,97	423,6	1 836 504	157	1,2	42	2,8	0,996
120	1,86	146	6,01	426,6	2 061 880	168	1,2	45	2,5	0,984
125	1,89	149	6,08	431,4	2 173 062	172	1,2	45	2,5	0,996
130	1,56	132	6,35	451,2	2 193 647	166	1,2	42	3	0,997
135	1,72	137	6,44	457,2	2 342 369	171	1,2	45	2,8	0,995
140	1,75	144	6,52	463,2	2 496 830	176	1,2	45	2,8	0,996
145	1,6	135	6,74	478,8	2 570 635	174	1,2	45	3	0,993
150	1,63	140	6,81	483,6	2 702 848	178	1,2	45	3	0,998
155	1,65	147	6,90	489,6	2 873 559	183	1,2	45	3	0,997
160	1,48	130	7,17	509,4	2 880 971	177	1,2	45	3,3	0,997
165	1,51	137	7,26	515,4	3 062 583	182	1,2	45	3,3	0,994
170	1,52	141	7,33	520,2	3 212 508	186	1,2	45	3,3	0,997
175	1,54	146	7,39	525	3 366 595	190	1,2	45	3,3	0,999

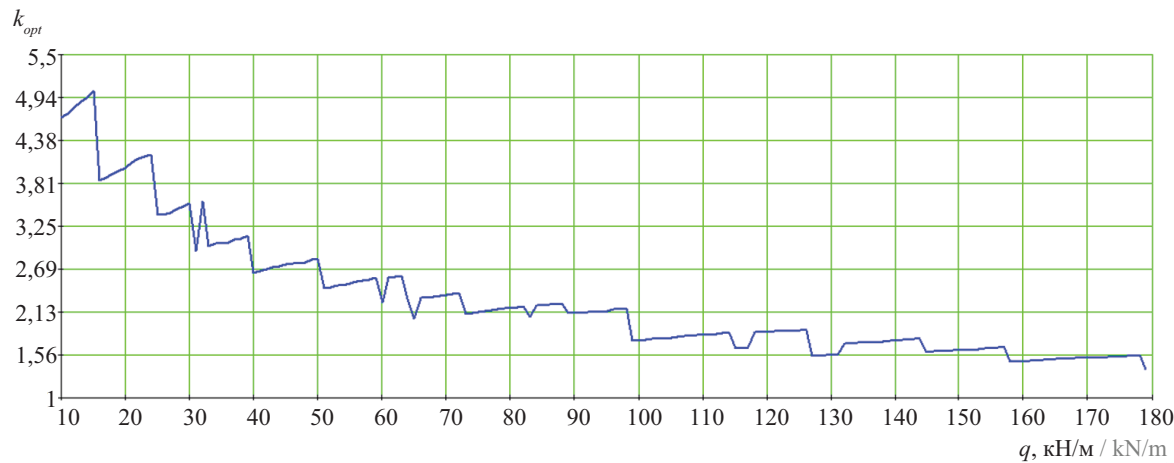


Рис. 2. Изменение k_{opt} в зависимости от нагрузки, при пролете 18 м

Fig. 2. Change of k_{opt} depending on the load, with a span of 18 m

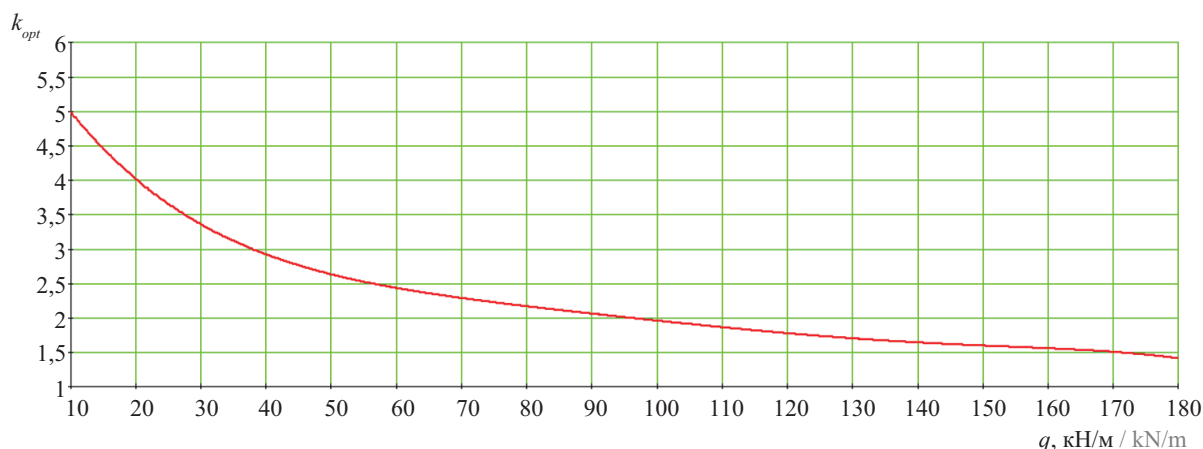


Рис. 3. График сглаженной функции $k_{opt}^{18}(q)$ при пролете 18 м

Fig. 3. Graph of the smoothed function $k_{opt}^{18}(q)$ with a span of 18 m

Для минимизации ошибки найдем частные производные SSE по каждому из коэффициентов и приравняем их к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dSSE}{da_0} = 0; \quad \frac{dSSE}{da_1} = 0; \quad \frac{dSSE}{da_2} = 0; \\ \frac{dSSE}{da_3} = 0; \quad \frac{dSSE}{da_4} = 0; \quad \frac{dSSE}{da_5} = 0. \end{aligned}$$

Далее составим систему уравнений и методом Гаусса решим ее. В результате получим:

$$\begin{aligned} a_0 = 6,4395; \quad a_1 = -1,673 \cdot 10^{-1}; \\ a_2 = 2,887 \cdot 10^{-3}; \quad a_3 = -2,643 \cdot 10^{-5}; \\ a_4 = 1,195 \cdot 10^{-7}; \quad a_5 = -2,102 \cdot 10^{-10}. \end{aligned}$$

Тогда уравнение функции $k_{opt}(q)$ при пролете 18 м можно записать так:

$$\begin{aligned} k_{opt}^{18}(q) = -2,102 \cdot 10^{-10} \cdot q^5 + 1,195 \cdot 10^{-7} \times \\ \times q^4 - 2,643 \cdot 10^{-5} \cdot q^3 + 2,887 \cdot 10^{-3} \cdot q^2 - \\ - 1,673 \cdot 10^{-1} \cdot q + 6,395. \end{aligned} \quad (8)$$

На графике (рис. 3) показана зависимость $k_{opt}(q)$ при пролете 18 м с шагом нагрузки 1 кН/мп. Условная гибкость стенки $\lambda_{w,opt}$ может быть определена по графику (рис. 4) при значении распределенной нагрузки q , данной с шагом 1 кН/мп. Как видно из графика, условная гибкость стенки имеет сложный закон распределения относительно распределенной нагрузки q , это значительно усложняет аппроксимацию функции $\lambda_{w,opt}^{18}(q)$.

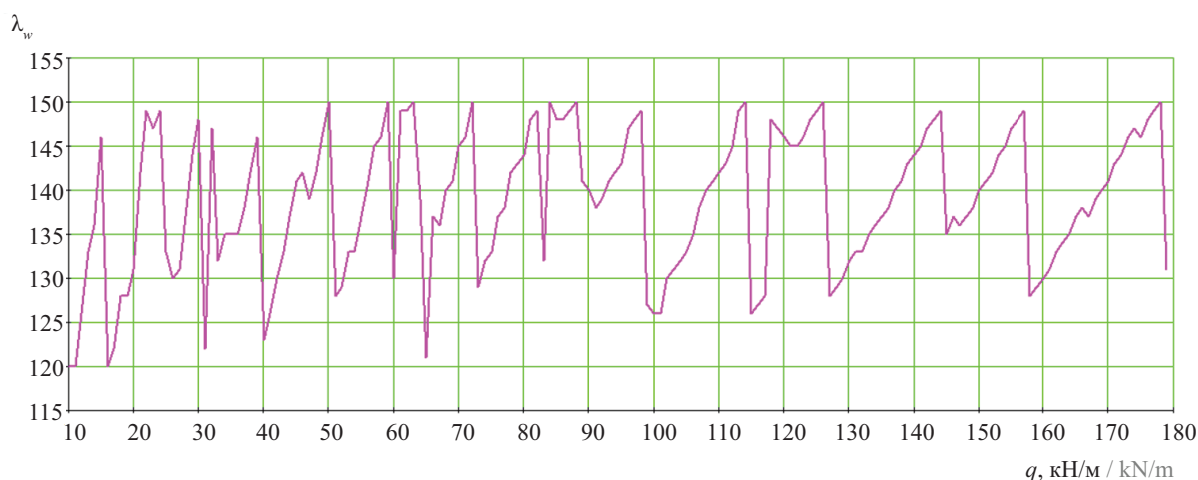


Рис. 4. Изменение $\lambda_{w,opt}$ в зависимости от нагрузки при пролете 18 м

Fig. 4. Change of $\lambda_{w,opt}$ depending on the load, with a span of 18 m

Из графика (рис. 4) следует, что основные значения $\lambda_{w, opt}$ лежат в диапазоне 130–150 при равномерно распределенной нагрузке от 50 кН/мп. Можно сделать вывод, что этот диапазон и будет являться основным при выборе λ_w при пролете 18 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты численного исследования показали, что предложенный способ определения генеральных размеров стальных сварных балок, помимо уменьше-

ния трудозатрат для инженера-конструктора, позволяет подбирать сечения балок, оптимальные по весу.

В рамках исследования был проведен итерационный подбор оптимальных сечений балок с пролетами 18, 16, 14, и 12 м и нагрузками от 10 до 175 кН/м, варьируя значения условной гибкости от 120 до 150 и k_{opt} таким образом, чтобы вес балки при данных условиях был минимальным.

В результате получены табличные данные с оптимальными сечениями для указанных диапазонов. Построение графиков зависимости k_{opt} и условной

Табл. 5. Коэффициенты $\lambda_{w, opt}$ и k_{opt} при различных пролетах и нагрузках

Table 5. Coefficients $\lambda_{w, opt}$, k_{opt} at different spans and loads

L = 16 м / m					L = 14 м / m				L = 12 м / m			
q, кН/м kN/m	k _{opt}	λ _w	Вес, т Weight, t	A, см² cm²	k _{opt}	λ _w	Вес Weight, t	A, см² cm²	k _{opt}	λ _w	Вес, т Weight, t	A, см² cm²
10	4,54	120	1,37	109	3,68	120	0,96	87,8	2,85	120	0,65	68,8
15	4,78	123	1,55	124	3,85	120	1,09	99,2	2,98	120	0,73	77,6
20	3,84	120	1,82	145	4,07	142	1,26	115	3,12	136	0,84	89,6
25	4,01	133	2,01	160	3,2	123	1,41	129	2,45	120	0,96	102,4
30	4,18	147	2,18	174	3,33	140	1,55	141,2	2,53	129	1,04	111,2
35	3,45	135	2,39	190	2,74	126	1,70	155	2,09	120	1,17	124
40	3,58	149	2,56	204	2,84	140	1,82	166	2,15	127	1,21	128,8
45	3,03	133	2,74	218	2,4	125	1,97	179,6	2,2	133	1,29	136,8
50	2,63	121	2,92	233	2,47	136	2,05	186,6	1,86	120	1,40	148,8
55	2,72	135	3,04	242	2,53	142	2,15	196,4	1,9	129	1,44	153,6
60	2,77	140	3,18	254	2,19	130	2,30	209,8	1,93	130	1,51	160,8
65	2,44	128	3,36	268	2,23	135	2,35	214,8	1,99	147	1,56	166,4
70	2,51	140	3,46	276	2,29	150	2,43	221,8	1,71	127	1,67	177,6
75	2,24	129	3,64	290	2,32	150	2,53	230,4	1,74	136	1,71	181,6
80	2,29	138	3,73	298	2,03	135	2,67	243,6	1,75	134	1,77	188,8
85	2,31	136	3,85	307	2,07	143	2,73	248,6	1,8	148	1,82	193,6
90	2,37	148	3,95	316	1,84	127	2,86	260,8	1,56	127	1,92	204,8
95	2,12	133	4,11	328	1,88	136	2,91	265,8	1,6	137	1,96	208,8
100	2,17	143	4,20	335	1,91	144	2,97	270,8	1,63	147	2,06	219,2
105	2,06	132	4,37	349	1,92	143	3,07	280	1,63	140	2,06	219,2
110	2,22	149	4,40	352	1,74	136	3,23	295	1,46	134	2,19	233,6
115	2,11	138	4,57	365	1,75	135	3,26	297	1,46	129	2,20	234,4
120	2,14	143	4,65	371	1,78	144	3,31	302	1,48	136	2,23	237,6
125	1,75	127	4,89	390	1,81	150	3,35	306	1,51	147	2,27	241,6
130	1,78	131	4,95	395	1,71	136	3,50	319	1,34	127	2,38	252,8
135	1,8	136	5,01	400	1,73	142	3,54	323	1,37	134	2,41	256
140	1,83	144	5,08	406	1,76	149	3,68	335,8	1,39	141	2,44	259,2
145	1,86	149	5,14	410	1,76	143	3,68	335,8	1,39	141	2,52	268
150	1,87	148	5,34	427	1,79	150	3,72	339,8	1,4	141	2,53	269,6
155	1,87	145	5,36	428	1,46	134	3,95	360	1,42	148	2,56	272,8
160	1,89	150	5,42	433	1,47	132	3,96	361	1,33	130	2,6	284,8
165	1,56	131	5,65	451	1,49	138	4,00	365	1,35	135	2,70	287,2
170	1,72	136	5,71	456	1,51	144	4,04	365	1,37	142	2,73	290,4
175	1,74	141	5,77	461	1,52	148	4,08	372	1,39	147	2,75	292,8

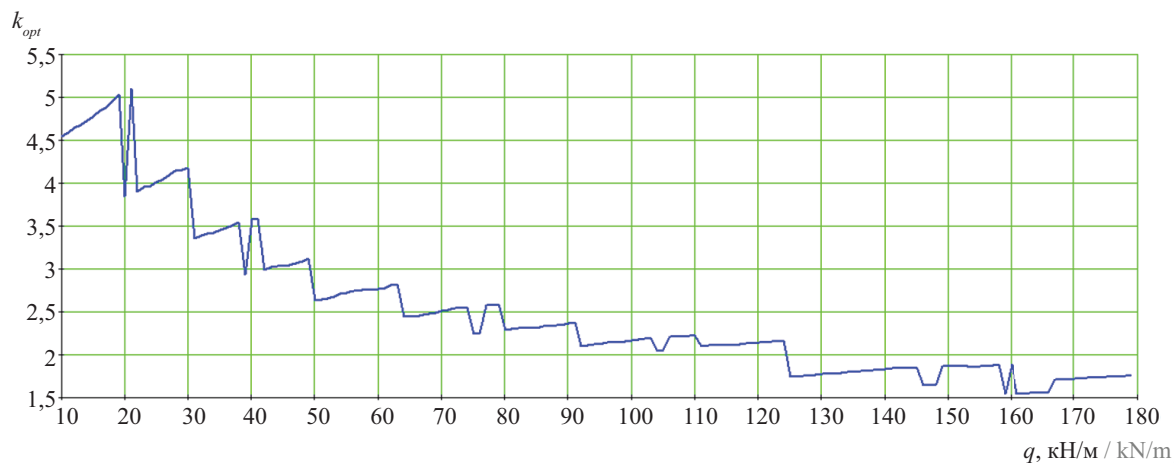


Рис. 5. Изменение k_{opt} в зависимости от нагрузки при пролете 16 м

Fig. 5. Change of k_{opt} depending on the load, with a span of 16 m

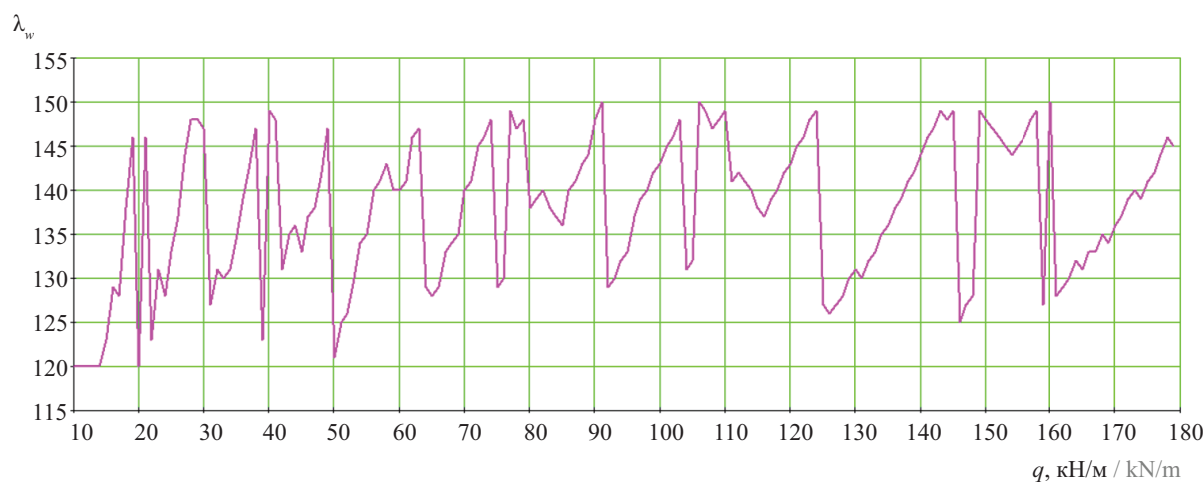


Рис. 6. Изменение $\lambda_{w,opt}$ в зависимости от нагрузки при пролете 16 м

Fig. 6. Change of $\lambda_{w,opt}$ depending on the load, with a span of 16 m

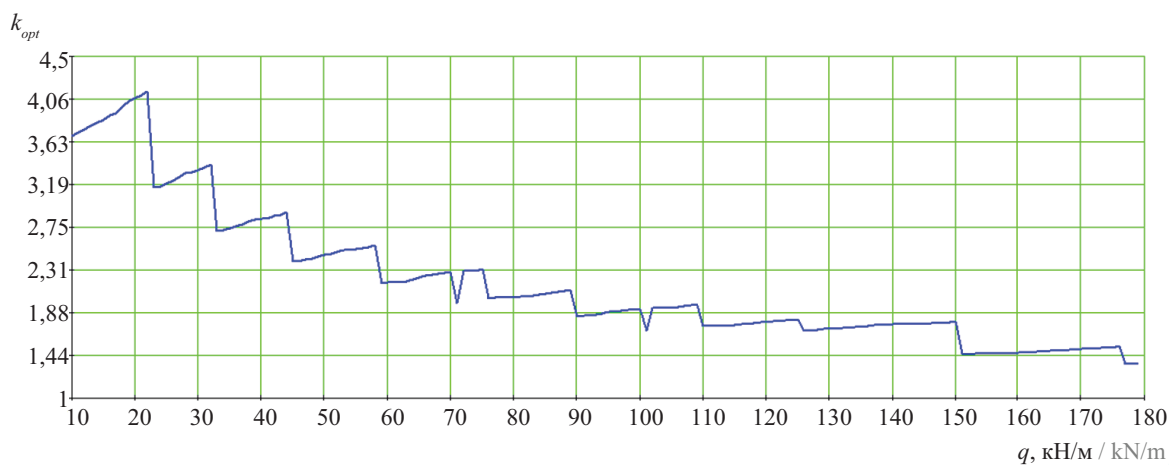


Рис. 7. Изменение k_{opt} в зависимости от нагрузки при пролете 14 м

Fig. 7. Change of k_{opt} depending on the load, with a span of 14 m

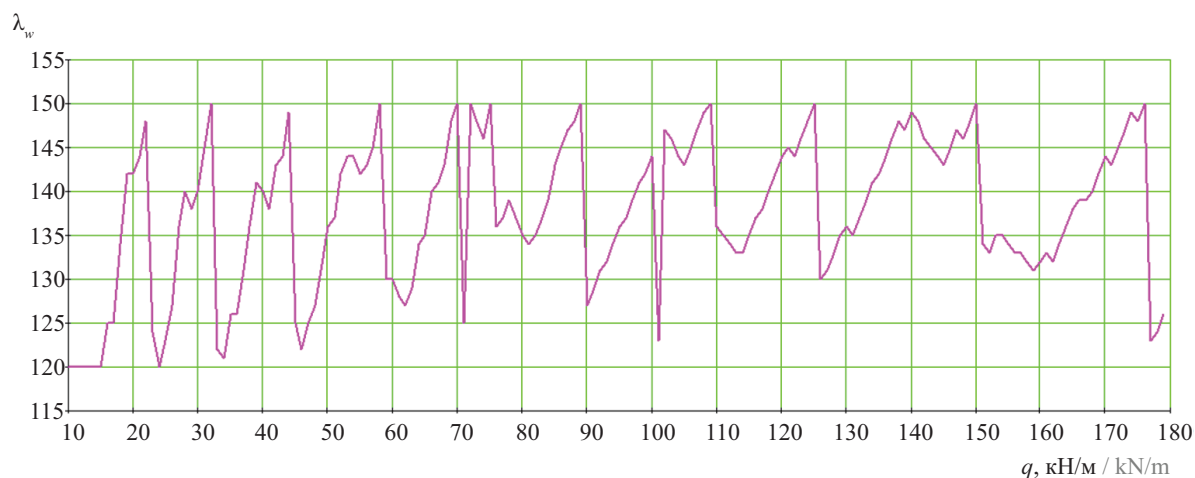


Рис. 8. Изменение $\lambda_{w,opt}$ в зависимости от нагрузки при пролете 14 м

Fig. 8. Change of $\lambda_{w,opt}$ depending on the load, with a span of 14 m

гибкости от нагрузки q позволило выявить возможность сглаживания функции и получить уравнение полинома $k_{opt}(q)$, которое может быть использовано для определения k_{opt} при подстановке значения q .

В табл. 5 приведены значения подобранных оптимальных по весу сечений и коэффициентов $\lambda_{w,opt}$ и k_{opt} при пролетах 16, 14 и 12 м, дана нагрузка и соответствующая ей площадь поперечного сечения и итоговый вес балки.

На графике (рис. 5) показана зависимость $k_{opt}(q)$ при пролете 16 м с шагом нагрузки 1 кН/мп. На графике зависимости $\lambda_{w,opt}^{16}(q)$ (рис. 6) приведены значения условной гибкости при таком же шаге изменения нагрузки q .

На графике (рис. 7) показана зависимость $k_{opt}(q)$ при пролете 14 м с шагом нагрузки 1 кН/мп. На графике зависимости $\lambda_{w,opt}^{14}(q)$ (рис. 8) приведены значения условной гибкости при таком же шаге изменения нагрузки q .

На графике (рис. 9) показана зависимость $k_{opt}(q)$ при пролете 12 м с шагом нагрузки 1 кН/мп. На графике зависимости $\lambda_{w,opt}^{12}(q)$ (рис. 10) приведены

значения условной гибкости при таком же шаге изменения нагрузки q .

Аппроксимируя графики функций $k_{opt}(q)$ при пролетах 16, 14, 12 м (рис. 5, 7, 9) аналогично, как при пролете 18 м, уравнения функций $k_{opt}(q)$ можно записать так:

$$k_{opt}^{16}(q) = 1,985 \cdot 10^{-10} \cdot q^5 - 7,97 \cdot 10^{-8} \cdot q^4 + 9,341 \cdot 10^{-6} \cdot q^3 + 1,326 \cdot 10^{-5} \cdot q^2 - 0,06986 \cdot q + 5,676; \quad (9)$$

$$k_{opt}^{14}(q) = 1,253 \cdot 10^{-10} \cdot q^5 - 5,613 \cdot 10^{-8} \cdot q^4 + 7,768 \cdot 10^{-6} \cdot q^3 - 0,0001596 \cdot q^2 - 0,04412 \cdot q + 4,497; \quad (10)$$

$$k_{opt}^{12}(q) = 3,787 \cdot 10^{-11} \cdot q^5 - 1,672 \cdot 10^{-8} \cdot q^4 + 2,037 \cdot 10^{-6} \cdot q^3 + 7,603 \cdot 10^{-5} \cdot q^2 - 0,03368 \cdot q + 3,446. \quad (11)$$

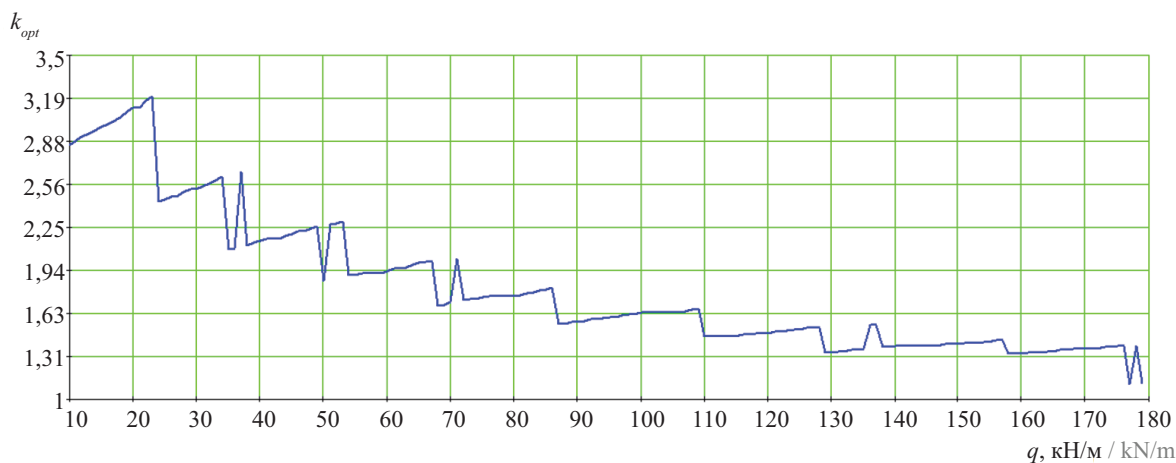


Рис. 9. Изменение k_{opt} в зависимости от нагрузки при пролете 12 м

Fig. 9. Change of k_{opt} depending on the load, with a span of 12 m

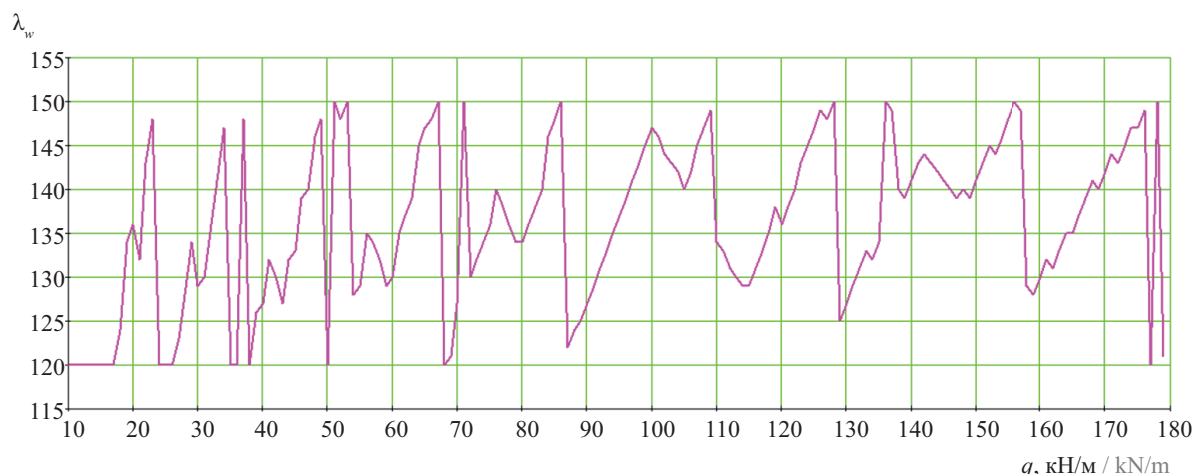


Рис. 10. Изменение $\lambda_{w,opt}$ в зависимости от нагрузки при пролете 12 м

Fig. 10. Change of $\lambda_{w,opt}$ depending on the load, with a span of 12 m

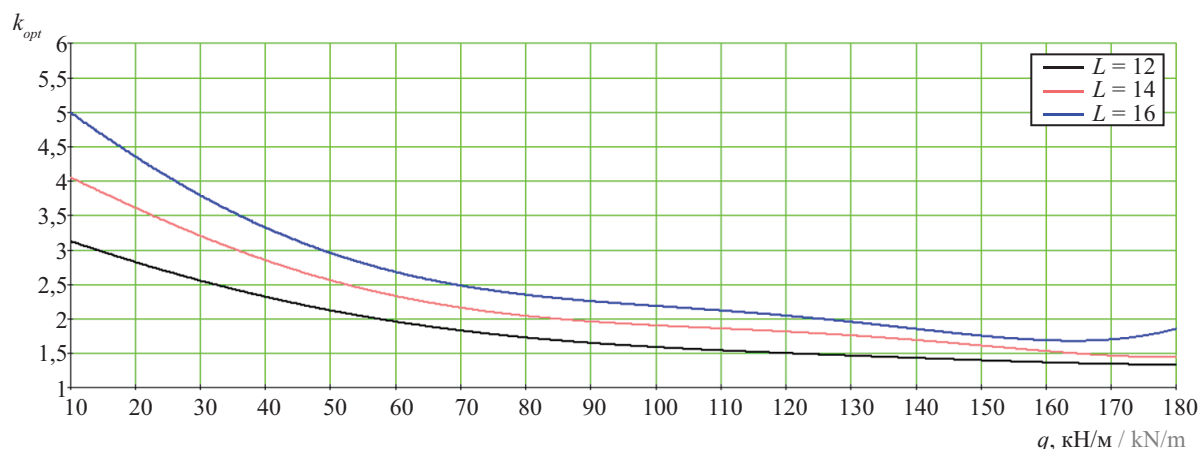


Рис. 11. График сглаженных функций $k_{opt}(q)$ при пролетах 16, 14, 12 м

Fig. 11. Graph of smoothed functions $k_{opt}(q)$ with spans of 16, 14, 12 m

Графики сглаженных функций $k_{opt}(q)$ показаны на рис. 3 и 11. Пример подбора сечения сварной балки по представленной в исследовании методике приведен в табл. 3, алгоритм подбора сечения — на рис. 12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация размеров сварных балок является актуальной задачей, поскольку она имеет прямое влияние на экономическую эффективность конструкций. Снижение веса металлоконструкций ведет к сокращению затрат на материалы, производство, транспортировку и монтаж. В свете этой важности данное исследование направлено на определение оптимальных размеров сварных балок при заданных нагрузках и пролетах для достижения минимального веса конструкции.

Для решения поставленной задачи была применена энергетическая теория прочности. Путем расчета потенциальной энергии упругой деформации балки и последующего взятия первой производной

по высоте балки получено выражение для коэффициента k_{opt} , который характеризует оптимальное отношение высоты балки к толщине стенки и ширине балки к толщине пояса.

Представленный подход к оптимизации размеров сварных балок обеспечивает возможность применения как табличных данных, так и выведенных формул и построенных графиков для быстрого и точного определения оптимальных параметров. Методика, предложенная в рамках настоящего исследования, — простая и удобная для инженеров, облегчает процесс проектирования и повышает эффективность использования материалов и конструкций.

Внедрение этой методики в инженерную практику позволит добиться более эффективного использования материалов и человеческих ресурсов, что скажется на снижении стоимости и проектных работ.

Следует отметить, что исследования в этой области имеют большой потенциал для дальнейшего развития и усовершенствования методов оптими-

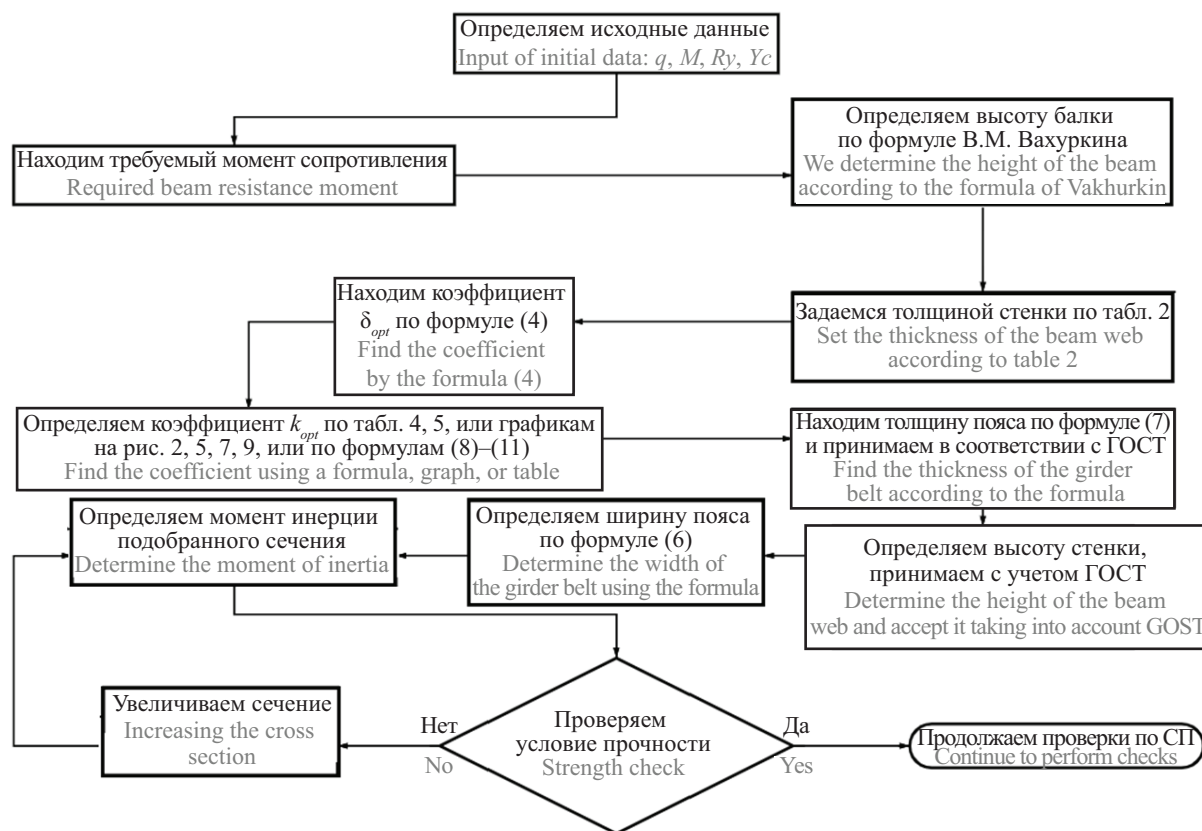


Рис. 12. Блок-схема алгоритма подбора оптимального сечения сварной балки

Fig. 12. Block diagram of the algorithm for selecting the optimal section of the welded beam

зации сварных балок [14–17]. Возможным направлением будущих исследований может стать анализ влияния дополнительных факторов на оптимальные параметры балок, а также разработка новых методов оптимизации, учитывающих сложные геоме-

трические и материаловедческие характеристики сварных конструкций. Такие исследования могут способствовать совершенствованию инженерных методов и повышению уровня безопасности и надежности металлоконструкций в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хижавский О.А. Оптимальные параметры главных балок стальных пролетных строений разрезной и неразрезной систем военных железнодорожных мостов // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева. 2015. № 3. С. 73–76. EDN VTFFRH.
2. Василькин А.А. Оптимизация стальных конструкций с использованием САПР // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (54). С. 116–124. EDN VLONOV.
3. Гинзбург А.В., Василькин А.А. Постановка задачи оптимального проектирования стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2014. № 6. С. 52–62. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.6.52-62. EDN SIJYCX.
4. Гарифуллин М.Р., Семенов С.А., Беляева С.В., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооруже-

- ния // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2 (17). С. 107–124. EDN RWGNQF.
5. Туснин А.Р. Автоматизация расчетов несущей способности элементов стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 10. С. 22–23. EDN MVMUDB.
6. Василькин А.А., Щербина С.В. Построение системы автоматизированного проектирования при оптимизации стальных стропильных ферм // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 21–37. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.21-37. EDN TIVXSZ.
7. Василькин А.А. Информационная технология автоматизации поддержки поиска проектных решений стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 76–80. EDN VZDQBN.
8. Ерохин А.П. Применение параметрических моделей в автоматизированном проектировании авиационных конструкций // Новое слово в нау-

ке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. 2013. № 6. С. 95–99. EDN REDWEJ.

9. Соболев Ю.В., Василькин А.А., Колосков А.Д. Определение напряженно-деформированного состояния стенки с геометрическими дефектами в области монтажного стыка численными методами // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 12. С. 44–45. EDN RYAOOP.

10. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Оптимальное проектирование железобетонных плит перекрытий по критерию минимальной стоимости // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. 2016. С. 424–433. EDN VXXKVL.

11. Штейнбрехер О.А., Бурнышева Т.В. Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 10 (70). С. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1688. EDN ZHZQXX.

12. Бажин Г.М., Кудряшов Д.В. Оптимальные размеры стальных балок на примере прокатных

профилей // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. С. 344–346. EDN ПADIY.

13. Вахуркин В.М. Наивыгоднейшая форма двутавровых балок // Бюллетень строительной техники. 1949. № 21. С. 3–8.

14. Гольденберг Л.И. Прочность и устойчивость некоторых эффективных типов тонколистовых металлических оболочек : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1990. 58 с. EDN ZJOMRH.

15. Ben-Tal A., Zowe J. A unified theory of first and second order conditions for extremum problems in topological vector spaces // Mathematical Programming Studies. 1982. Vol. 19. Pp. 39–76. DOI: 10.1007/bfb0120982

16. Volkov A.A., Vasilkin A.A. Optimal design of the steel structure by the sequence of partial optimization // Procedia Engineering. 2016. Pp. 850–855. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.176. EDN WHYWCS.

17. Arruda E., Ourique F., Almudevar A., Silva R. On cost based algorithm selection for problem solving // American Journal of Operations Research. 2013. Vol. 3. Issue 5. Pp. 431–438. DOI: 10.4236/ajor.2013.35041

Поступила в редакцию 11 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 28 августа 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Григорий Михайлович Бажин — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 809764, ORCID: 0000-0002-7960-6421; gbajin@mail.ru.

REFERENCES

1. Khizhavsky O.A. Optimal parameters of the main beams of steel spans of split and continuous systems of military railway bridges. *Bulletin of the Military Academy of Material and Technical Support named after army General A.V. Khruleva*. 2023; 5:73-76. EDN VTFFRH. (rus.).

2. Vasilkin A.A. Optimization of steel structures using cad-systems. *Journal of Construction and Architecture*. 2016; 1(54):116-124. EDN VLONOV. (rus.).

3. Ginzburg A.V., Vasil'kin A.A. Problem statement for optimal design of steel structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 6:52-62. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.6.52-62. EDN SIJYCX. (rus.).

4. Garifullin M.R., Semenov S.A., Belyaeva S.V., Porivaev I.A., Safiullin M.N., Semenov A.A. The search of rational shape of spatial metal roof of long-span sport arena. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 2(17):107-124. EDN RWGNQF. (rus.).

5. Tusnin A.R. Automation of calculations of bearing capacity of steel structures' elements. *Industrial and*

Civil Engineering. 2010; 10:22-23. EDN MVMUDB. (rus.).

6. Vasil'kin A.A., Shcherbina S.V. Development of a computer-aided design system for optimization of steel trusses. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 2:21-37. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.21-37. EDN TIVXSZ. (rus.).

7. Vasilkin A.A. Information technology of automation of search support for design solutions of steel structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 5:76-80. EDN VZDQBN. (rus.).

8. Erokhin A.P. Application of parametric models in automated design of aircraft structures. *New Word in Science and Practice: Hypotheses and Approbation of Research Results*. 2013; 6:9599. EDN REDWEJ. (rus.).

9. Vasilkin A.A., Koloskov A.D. Determination of the stress and strain state of the wall with geometric imperfections in the area of the field joint by numerical methods. *Industrial and Civil Engineering*. 2005; 12:44-45. EDN RYAOOP. (rus.).

10. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Optimal design of reinforced concrete slabs according to the cri-

terion of minimum cost. *Modern problems of calculation of reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts*. 2016; 424-433. EDN VXXKVL. (rus.).

11. Shteynbrekher O.A., Burnysheva T.V. Solving the problem of mesh cylindrical structure parametric optimization. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2017; 10(70):2. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1688. EDN ZHZQXX. (rus.).

12. Bazhin G.M., Kudryashov D.V. Optimal dimensions of steel beams on the example of rolling profiles. *Innovation and Investment*. 2023; 5:344-346. EDN IIADIY. (rus.).

13. Vakhurkin V.M. The most advantageous form of I-beams. *Bulletin of Construction Machinery*. 1949; 21:3-8. (rus.).

14. Goldenberg L.I. *Strength and stability of some effective types of thin-sheet metal shells : abstract. dis. ... Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1990; 58. EDN ZOMR. (rus.).

15. Ben-Tal A., Zowe J. A unified theory of first and second order conditions for extremum problems in topological vector spaces. *Mathematical Programming Studies*. 1982; 19:39-76. DOI: 10.1007/bfb0120982

16. Volkov A.A., Vasilkin A.A. Optimal design of the steel structure by the sequence of partial optimization. *Procedia Engineering*. 2016; 850-855. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.176. EDN WHYWCS.

17. Arruda E., Ourique F., Almudevar A., Silva R. On cost based algorithm selection for problem solving. *American Journal of Operations Research*. 2013; 3(5):431-438. DOI: 10.4236/ajor.2013.35041

Received June 11, 2023.

Adopted in revised form on August 13, 2023.

Approved for publication on August 28, 2023.

BIONOTES: Grigoriy M. Bazhin — senior lecturer of the Department of Metal and Timber Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 809764, ORCID: 0000-0002-7960-6421; gbajin@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК [533.6:624.07]:004.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762

Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни

Александр Михайлович Белостоцкий, Ирина Юрьевна Негрозова,
Олег Сергеевич Горячевский

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Большепролетные и гибкие конструкции весьма чувствительны к воздействию ветра. Такие конструкции подвержены возникновению аэроупругих явлений. В истории известны случаи, когда в результате ветрового воздействия происходило обрушение конструкции. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов оценки возникновения аэроупругой неустойчивости.

Материалы и методы. Динамические и жесткостные характеристики объекта, используемые при инженерной оценке возможности аэроупругих явлений, определили с помощью программного комплекса (ПК) ANSYS Mechanical. Моделирование обтекания исследуемого объекта провели в ПК ANSYS Fluent. Для подтверждения полученных оценок о невозможности возникновения аэроупругой неустойчивости по нормативной методике выполнили прямое численное моделирование двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical).

Результаты. С применением разработанных расчетных динамических конечно-элементных моделей установили собственные частоты и формы колебаний. Провели оценку возможности возникновения галопирования по нормативной методике для исследуемого шпиля при скоростях ветра, наблюдаемых на площадке строительства. Осуществили прямое численное моделирование связанной задачи двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS при максимально возможной скорости ветра для места строительства для наиболее опасного направления ветра (полученного по результатам инженерной оценки).

Выводы. Проведенная оценка о возможности возникновения аэроупругой неустойчивости по нормативной методике и поверочный двухсторонний связанный расчет аэроупругих колебаний шпиля подтвердили отсутствие явлений аэроупругой неустойчивости при максимально возможной скорости ветра для места строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэроупругость, аэроупругая неустойчивость, галопирование, критерий Ден-Гартога, численное моделирование, связанная задача, FSI

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белостоцкий А.М., Негрозова И.Ю., Горячевский О.С. Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1745–1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762

Автор, ответственный за переписку: Ирина Юрьевна Негрозова, irina-lanzova@mail.ru.

Estimation of aeroelastic stability of a tower spire

Alexander M. Belostotsky, Irina Yu. Negrozova, Oleg S. Goryachevsky

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

ABSTRACT

Introduction. Large-span and flexible structures are very sensitive to the effects of wind. Such structures are subject to the occurrence of aeroelastic phenomena. In history there are known cases when as a result of wind impact, there was a collapse of the structure. In this regard, the development of methods for estimation of aeroelastic instability is an urgent task.

Materials and methods. Dynamic and stiffness characteristics of the object, used in engineering assessment of the possibility of aeroelastic phenomena, were determined using the ANSYS Mechanical software package. Modelling of the flow around the object under study was carried out using the ANSYS Fluent software package. To confirm the obtained estimates of the impossibility of the occurrence of aeroelastic instability according to the normative method, direct numerical simulation of the two-sided interaction between the spire and the air flow was carried out in the ANSYS software (two-way FSI, implemented by a combination of Fluent and Mechanical modules).

Results. Using the developed computational dynamic finite element models, natural frequencies and vibration modes are determined. An assessment of the possibility of galloping occurrence was carried out according to the normative method for the studied spire at velocity observed at the construction site. Direct numerical modelling of the coupled problem of two-sided interaction between the spire and the air flow was carried out in the ANSYS software package at the maximum possible wind speed for the construction site for the most dangerous wind direction (obtained from the results of engineering assessment).

Conclusions. The assessment of the possibility of aeroelastic instability according to the normative methodology and verification two-sided coupled calculation of aeroelastic oscillations of the spire confirmed the absence of aeroelastic instability phenomena at the maximum possible wind speed for the construction site.

KEYWORDS: aeroelasticity, aeroelastic instability, galloping, Den-Hartog criterion, numerical modelling, coupled problem, FSI

FOR CITATION: Belostotsky A.M., Negrozova I.Yu., Goryachevsky O.S. Estimation of aeroelastic stability of a tower spire. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1745-1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762 (rus.).

Corresponding author: Irina Yu. Negrozova, irina-lanzova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамическая неустойчивость может рассматриваться как процесс, происходящий исключительно внутри потока, когда, например, от неподвижного тела отрывается дорожка вихрей или быстро расходящаяся спутная струя. Но если тело в потоке жидкости отклоняется под действием некоторой силы и это начальное отклонение вызывает последующие отклонения, носящие колебательный характер или характер нарастающих во времени перемещений, то в таком случае говорят, что возникает аэроупругая неустойчивость.

До 1940-х гг. нагрузку от ветра считали второстепенной и не учитывали даже ее статическую составляющую. Так продолжалось вплоть до известного разрушения моста Такома-Нерроуз (Tacoma Narrows Bridge) в США. Несмотря на то что до крушения Такома-Нерроуз моста были известны и другие случаи обрушения (мост аббатства Драйбург в 1818 (Шотландия), цепной пирс в Брайтоне в 1896 (Англия), железнодорожный мост через Ферт-оф-Тей в 1879 (Шотландия)) [1], именно эта авария стала отправной точкой для проведения научных исследований и развития подходов для анализа аэродинамической неустойчивости конструкций. Появились первые фундаментальные работы Кармана, Давенпорта [2, 3], М.Ф. Барштейна [4], Э. Симиу, Р. Сканлана [5], Дж.П. Ден-Гартога [6, 7]. Опираясь на эти исследования, разработаны инженерные методы оценки возникновения аэроупругой неустойчивости.

Традиционно определение ветрового воздействия, а впоследствии и эффектов аэроупругости, выполнялось с помощью экспериментальных методов. Экспериментальным исследованиям эффектов аэроупругости посвящено множество работ [8–12]. Среди них можно выделить труды, рассматривающие модель высотного здания CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council). Эта «эталонная» (калибровочная) простая модель здания для проведения экспериментов в аэродинамической трубе впервые предложена Р.Л. Уордлоу и Г.Ф. Мосс [13]. Имеется много других исследований, в том числе с применением аэроупругой модели для данной модели здания [14–20].

С развитием компьютерных технологий появился альтернативный метод изучения ветрового воздействия на здания и сооружения — численное моделирование. Численные исследования аэродинамики зданий берут начало с 1980-х гг. Существуют публикации, в которых освещается численное моделирование аэродинамики зданий [21–27]. Стоит

отметить статьи [28–31], в них приводится анализ воздействия ветра на здание Техасского технологического университета (TTU), которое использовалось в качестве контрольной задачи для проверки математических моделей, поскольку для данного объекта существуют натурные измерения и измерения в аэродинамической трубе.

Большинство исследований по определению ветрового воздействия на здания и сооружения основаны на предположении абсолютно твердого тела. Аэроупругие модели зданий в задачах вычислительной аэродинамики в строительстве встречаются редко. Моделирование прямого взаимодействия ветра с конструкцией является трудоемкой процедурой, так как включает расчет трехмерных сложных течений с движением сетки, оценку ветровых нагрузок на поверхность тела и решение структурной подсистемы, что обычно осуществляется по неявным схемам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание исследуемой конструкции

Объект исследования представляет собой треугольный в плане шпиль, находящийся на верху башни на отметке 248.400–288.100 (рис. 1). Несущие конструкции выполнены из армированного тяжелого бетона класса прочности В40 и углеродистой стали класса прочности С355.

Определение динамических и жесткостных характеристик наверху башни, включая шпиль

Динамические и жесткостные характеристики наверху, включая шпиль высотного здания, используются при инженерной оценке возможности аэроупругих явлений (резонансное вихревое возбуждение, галомирование, дивергенция и т.д.) в процессе эксплуатации здания и при численном моделировании поведения шпиля в нестационарном ветровом потоке. Установление динамических и жесткостных характеристик объекта производится численно с помощью его математической модели.

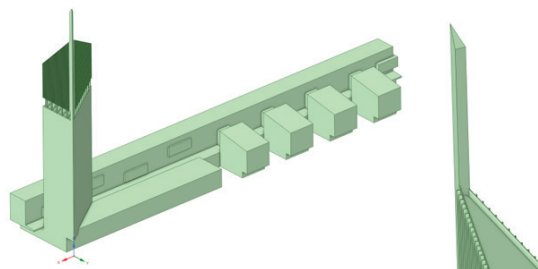


Рис. 1. Геометрия исследуемого шпиля

Fig. 1. Geometry of the studied spire

Математическая модель наведения башни, включая шпиль

Математическая модель объекта представляет собой балочно-оболочечную конечно-элементную модель с заданными поперечными сечениями и материалами несущих конструкций, граничными условиями и действующими нагрузками. Для построения математической модели объекта используется программный комплекс (ПК) ANSYS Mechanical.

В качестве граничных условий выступают ограничения всех шести степеней свободы по всем нижним ребрам стен и торцам колонн, т.е. $U_x = U_y = U_z = U_{RX} = U_{RY} = U_{RZ} = 0$. Граничные условия в математической модели показаны на рис. 2.

Математическая модель разбита на 26 806 конечных элементов (КЭ). Сетка КЭ математической модели исследуемого объекта приведена на рис. 3.

Математическая модель составлена из 24 отдельных элементов (ядро шпиля, стены, перекрытия, балки, колонны, фермы, каркас покрытия и наборы из них), между узлами конечно-элементной сетки которых заданы кинематические связи. Эти связи накладываются либо только на поступательные степени свободы (связи между опорными узлами стропильных ферм и колоннами, связи между элементами каркаса покрытия и верхними поясами стропильных ферм, связи между опорными узлами каркаса покрытия и колоннами), либо на все степени свободы (связи между железобетонными стенами, перекрытиями, балками, колоннами). Кинематические связи между элементами математической модели представлены на рис. 4.

Методика расчетов

Все расчеты проводились в линейной постановке (малые деформации и перемещения).

С целью выявления динамических характеристик объекта для его математической модели решалась задача на собственные значения. Решение осуществлялось с помощью блочного метода Ланцоша. Определялись первые 20 собственных частот и форм колебаний.

Для установления жесткостных характеристик объекта выполнялась серия из шести статических расчетов с использованием прямого метода решения, адаптированного для задач с разреженными матрицами. Рассматривается сечение шпиля на высоте 250,8 м, отстоящее от верхней грани его железобетонного ядра на 32 м (рис. 5). В характерной точке расчетного сечения шпиля, лежащей на пересечении его медиан, поочередно задаются сосредоточенные силы F_i и сосредоточенные моменты M_i , действующие вдоль одной из степеней свободы ($i = X, Y, Z$). Для каждого расчетного случая определяются перемещения этой точки по всем шести степеням свободы. По результатам расчетов устанавли-

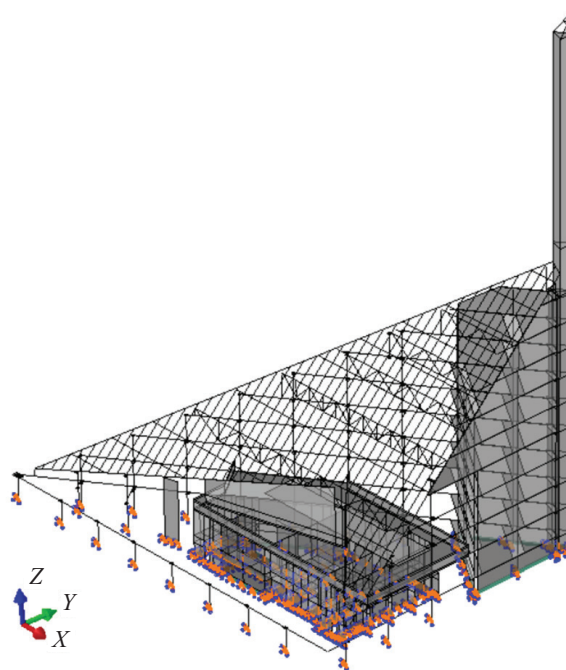


Рис. 2. Граничные условия в математической модели объекта (оранжевые стрелки — ограничение поступательных степеней свободы, синие стрелки — ограничение вращательных степеней свободы)

Fig. 2. Boundary conditions in the mathematical model of the object (orange arrows — limitation of translational degrees of freedom, blue arrows — limitation of rotational degrees of freedom)

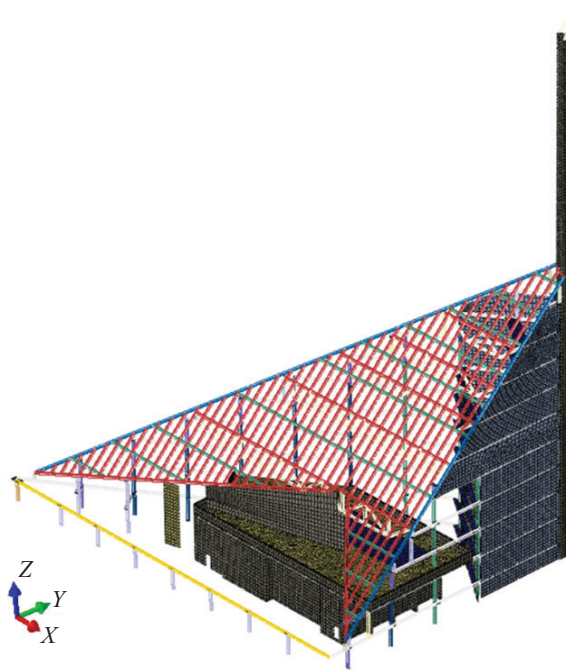


Рис. 3. Конечно-элементная сетка математической модели объекта

Fig. 3. Finite element mesh of the mathematical model of the object

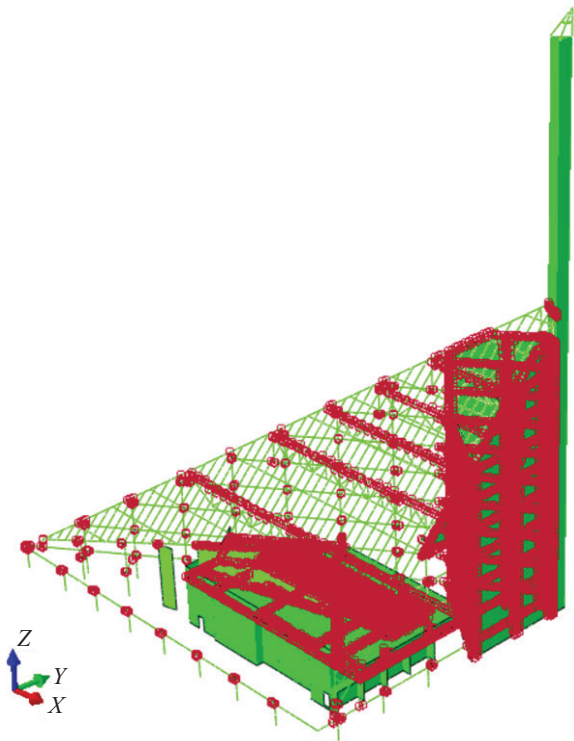


Рис. 4. Кинематические связи между элементами математической модели объекта

Fig. 4. Kinematic connections between the elements of the mathematical model of the object

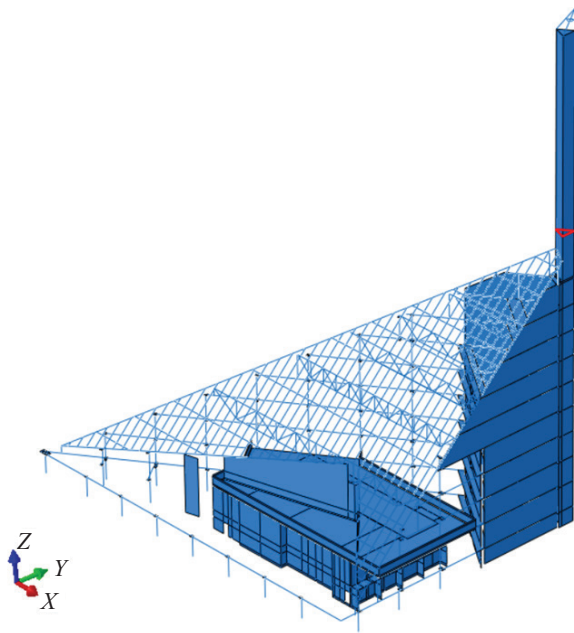


Рис. 5. Расчетное сечение шпиля (отмечено красным цветом), для которого определялась матрица жесткости нижележащей части объекта

Fig. 5. Estimated section of the spire (marked in red), for which the stiffness matrix of the underlying part of the object was determined

$$K = \begin{bmatrix} F_x / U_x & F_x / U_y & F_x / U_z & F_x / UR_x & F_x / UR_y & F_x / UR_z \\ F_y / U_x & F_y / U_y & F_y / U_z & F_y / UR_x & F_y / UR_y & F_y / UR_z \\ F_z / U_x & F_z / U_y & F_z / U_z & F_z / UR_x & F_z / UR_y & F_z / UR_z \\ M_x / U_x & M_x / U_y & M_x / U_z & M_x / UR_x & M_x / UR_y & M_x / UR_z \\ M_y / U_x & M_y / U_y & M_y / U_z & M_y / UR_x & M_y / UR_y & M_y / UR_z \\ M_z / U_x & M_z / U_y & M_z / U_z & M_z / UR_x & M_z / UR_y & M_z / UR_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

ливаются элементы K_{ij} матрицы жесткости K части объекта, лежащей ниже расчетного сечения шпиля:

Галопирование

В отечественных нормах СП^{1, 2} и в Eurocode³ приводится рекомендация для оценки возникновения эффекта галопирования.

В Eurocode указано, что некруглые поперечные сечения, включая сечения I -, U -, L - и T -образной формы, склонны к возникновению галопирования. Для круглых сечений галопирование невозможно, так как характер обтекания не меняется с изменением угла атаки ветра, однако наличие обледенения на круглых сечениях может привести к возникнове-

нию аэроупругих явлений галопирования. Колебания при галопировании начинаются с определенной начальной скорости $V_{cr,g}$, называемой критической. Амплитуды колебаний в этом случае быстро растут с увеличением скорости ветра.

В отечественных нормах СП 20.13330 отмечено, что аэродинамически неустойчивые колебания типа галопирования могут возникнуть в протяженных сплошностенчатых сооружениях при одновременном выполнении трех условий:

- 1) относительное удлинение $\lambda_e > 20$, где λ_e определяется в соответствии с указаниями СП 20.13330 ($\lambda_e = l/b = 175/1,8 = 97$);
- 2) коэффициент a_g удовлетворяет условию:

$$a_g = \left(\frac{dC_L}{da} + C_D \right) < 0, \quad (2)$$

где C_L и C_D — аэродинамические коэффициенты силы лобового сопротивления и подъемной (боко-

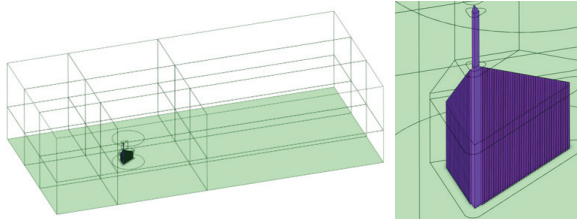


Рис. 6. Геометрическая модель шпиля с учетом навершия
Fig. 6. Geometrical model of the spire, taking into account the cap

вой) силы соответственно в поточной системе координат; α — угол атаки ветра;

3) максимально возможная скорость ветра для места строительства на высоте рассматриваемого сечения превышает критическую скорость $V_{cr,g}$:

$$V_{cr,g} = \frac{2 \cdot Sc \cdot f_i \cdot d}{-a_g \cdot \gamma_{cr}} \leq V_{max}, \quad (3)$$

где $Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho_a \cdot d^2}$ — число Скротона; m_1 — эквивалентная погонная масса, кг/м; δ_s — логарифмический декремент при поперечных колебаниях сооружения; ρ_a — плотность воздуха, кг/м³; d — характерный поперечный размер, м; f_i — частота колебаний по i -й изгибной собственной форме, Гц;

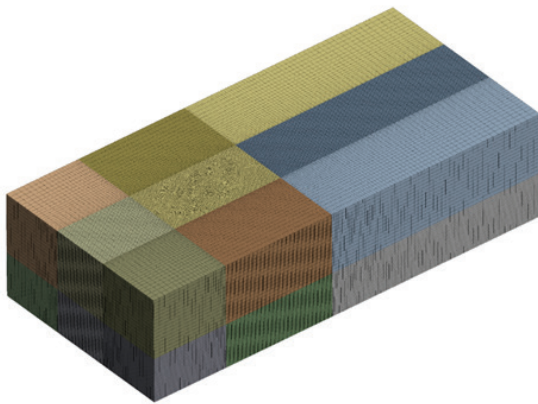


Рис. 7. Конечно-объемная сетка (1 743 746 узлов / конечных объемов)
Fig. 7. Finite volume mesh (1,743,746 nodes / finite volumes)

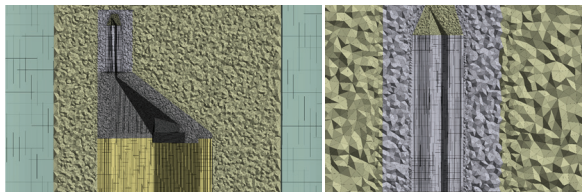


Рис. 8. Разрез конечно-объемной сетки
Fig. 8. Finite volume mesh section

γ_{cr} — коэффициент; V_{max} — максимально возможная скорость ветра для места строительства:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot w_0 \cdot k(z) \cdot \gamma_f}{\rho_a}}, \quad (4)$$

где w_0 , $k(z)$ и γ_f определяются в соответствии с указаниями СП 20.13330.2016.

Аэродинамическая модель

Проведение серии нестационарных аэродинамических расчетов для полной модели башни требует значительного времени в силу высокой размерности задачи. Исследуемый объект существенно выше имеющейся окружающей застройки, поэтому ее влияние на обтекание шпиля отсутствует. Кроме того, результаты выполненных исследований обтекания полной и усеченной модели башни показали близкие количественные (значения ветровой нагрузки) и качественные (картина обтекания шпиля) значения. Рассмотрение только части башни (шпиль и навершие) позволяет получить выигрыш во времени проведения расчетов (рис. 6).

Конечно-объемная сетка

Моделирование обтекания сечения шпиля проводилось в ANSYS Fluent, лучше зарекомендовавшем себя в решении нестационарных задач,

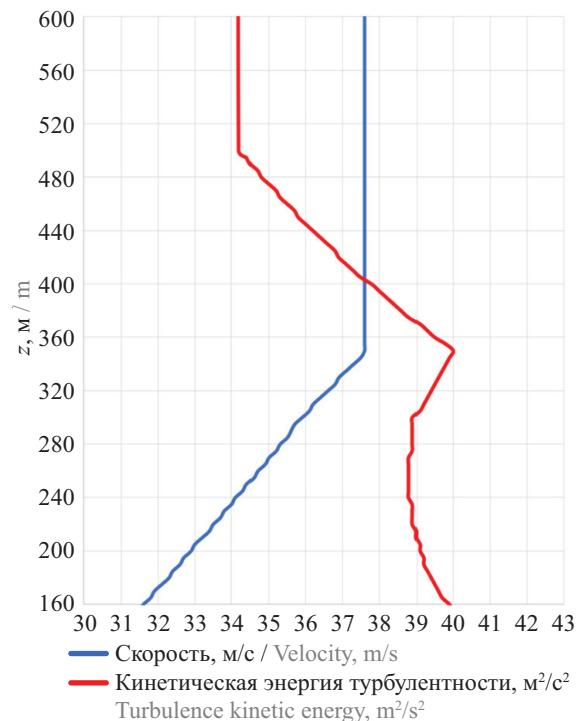


Рис. 9. Профили кинетической энергии турбулентности ТКЕ (красная линия), м²/с², и скорости ветра u (синяя линия), м/с, для первого ветрового района, тип местности В
Fig. 9. Profiles of turbulence kinetic energy TKE (red line), м²/с², and wind speed u (blue line), м/с, for the first wind region, terrain type B

а также обладающем большими возможностями настроек параметров решения подобных задач, чем ANSYS CFX.

Вся расчетная область воздуха разбивалась на конечные объемы с использованием модуля ANSYS Meshing. Вокруг шпиля был создан пограничный слой: 5 слоев вокруг шпиля, каждый следующий слой в 1,2 раза толще предыдущего. Поверхность шпиля разбита на элементы размером 0,2 м. Полученная расчетная сетка представлена на рис. 7, 8.

Граничные условия

Области расчета (рис. 6) задан соответствующий рассматриваемой среде домен Air (воздух), для которого определены следующие физические параметры: тип среды — несжимаемый воздух при температуре 25 °С и давление 1 атм.

Граничные условия на «входе» (INLET) для расчетной области (предназначенной для определения ветровых нагрузок) соответствуют первому ветровому району и типу местности В. При помощи разработанного макроса были пересчитаны профили давлений и пульсаций в аналогичные профили скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии для задания в ANSYS Fluent (рис. 9). Согласно рекомендациям Eurocode задан масштаб турбулентности, равный 300 м.

На «выходе» (OUTLET), а также на верхней грани воздушного домена заданы «мягкие» граничные условия типа Opening с нулевыми дополнительными давлениями. Также в этих условия назначены параметры турбулентности, как и на «входе».

На объекте задавалось условие «стенки с прилипанием» (No-Slip Wall, $U = V = W = 0$ м/с), которое не допускает проникновение воздуха через поверхность.

На остальных гранях задано условие симметрии (Symmetry).

Параметры расчетов

Для разработанной расчетной модели математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок проводилось в стационарной постановке

с использованием подхода турбулентности RANS (модель турбулентности Realizable $k-\epsilon$ модель).

В стационарных расчетах критерием окончания счета назначено максимальное количество итераций — 200 или достижение максимальных невязок по давлению и по всем компонентам скорости 10^{-3} .

Для решения в нестационарной постановке шаг физического времени решения принят равным 0,1 с.

Экспериментальное определение аэродинамических характеристик

С целью получения аэродинамических характеристик шпиля, а именно коэффициентов подъемной силы и силы лобового сопротивления, применялся альтернативный метод — физическое моделирование. Экспериментальные исследования проводились в аэродинамической трубе НИУ МГСУ сотрудниками Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций (УНПЛ ААИСК).

Описание экспериментальной аэродинамической трубы

Аэродинамическая труба имеет замкнутый циркуляционный контур и модульный вентиляторный блок из девяти установок при длине рабочей зоны 18,9 м. Основные технические характеристики: 1) длина рабочей зоны аэродинамической трубы МГСУ (18,9 м) позволяет корректировать профиль эпюры скорости потока, имитирующий приземный слой атмосферы в разных условиях; 2) диаметр рабочего поворотного стола — 3 м; 3) диапазон скоростей в рабочей зоне от 0 до 32 м/с.

Описание модели для физического (экспериментального) моделирования

Сотрудниками УНПЛ ААИСК разработана и изготовлена модель исследуемого объекта (рис. 10). Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета 1:75. Модель изготовлена из фанеры и листового ПВХ.



Рис. 10. Модель исследуемого объекта

Fig. 10. Model of the object under study



Рис. 11. Узел крепления шестикомпонентного силомоментного датчика

Fig. 11. Mounting unit for a six-component force-torque sensor

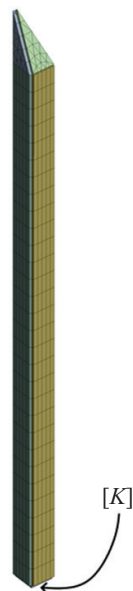


Рис. 12. Конечно-элементная сетка для шпиля (986 узлов)
Fig. 12. Finite element mesh for spire (986 nodes)

Внутримodelьное пространство выполнено с учетом необходимости размещения порядка 120 контрольных точек измерения давления на поверхности модели. В конструкции модели предусмотрен узел крепления шестикомпонентного силомоментного датчика, необходимого для определения интегральных характеристик ветровой нагрузки на кромках шпиля (рис. 11).

Численное моделирование аэроупругого взаимодействия шпиля с воздушным потоком

Для определения возможности возникновения аэроупругой неустойчивости инженерных оценок недостаточно. С целью подтверждения (или опровержения) возникновения аэроупругой неустойчивости конструкции необходимо провести экспериментальное (физическое) или численное

моделирование. Для рассматриваемого шпиля выполнение экспериментального моделирования невозможно в силу ограничений, возникающих при создании модели. Поэтому в данном случае безальтернативным является численное моделирование.

Параметры расчетной модели динамики шпиля

Для моделирования динамического поведения шпиля была создана оболочечная конечно-элементная модель (рис. 12). Применялся тип элементов SHELL181. По вертикали шпиль разбит на 80 элементов, каждая сторона треугольного сечения разбита на 5 элементов.

Влияние «отброшенной» части наверхия и шпиля учитывалось с помощью дополнительной симметричной матрицы жесткости K , установленной внизу моделируемой упругой части шпиля.

Параметры расчета в связанной постановке

Размер временного шага составляет $\Delta t = 0,1$ с. Физическое время расчета — 300 с.

Для процедуры связанного расчета существуют параметры, которые отвечают за обеспечение устойчивости и сходимости решения на каждом связанном шаге. К таким параметрам относятся:

- максимальное количество итераций для каждого связанного шага;
- критерий сходимости для нагрузок и перемещений;
- коэффициент нижней релаксации, участвующий в определении нагрузок и перемещений для каждой итерации связанного шага:

$$\varphi = \varphi_{pre} + \alpha(\varphi_{new} + \varphi_{pre}),$$

(5)

где φ — пересчитанное значение искомой величины на текущей итерации; φ_{pre} — значение переменной, вычисленной на предыдущей итерации; α — коэффициент релаксации; φ_{new} — значение переменной (нагрузка или перемещение), вычисленной на текущей итерации.

Табл. 1. Собственные частоты колебаний объекта
Table 1. Natural frequencies of the object oscillations

Номер собственной частоты колебаний Number of natural frequency of oscillations	Собственная частота колебаний, Гц Natural frequency of oscillation, Hz	Номер собственной частоты колебаний Number of natural frequency of oscillations	Собственная частота колебаний, Гц Natural frequency of oscillation, Hz
1	0,799	11	5,982
2	0,967	12	6,377
3	3,509	13	6,486
4	3,708	14	6,712
5	4,204	15	6,880
6	4,608	16	7,024
7	4,871	17	7,165
8	5,360	18	7,433
9	5,675	19	7,601
10	5,889	20	7,912

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 11, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 11, 2023

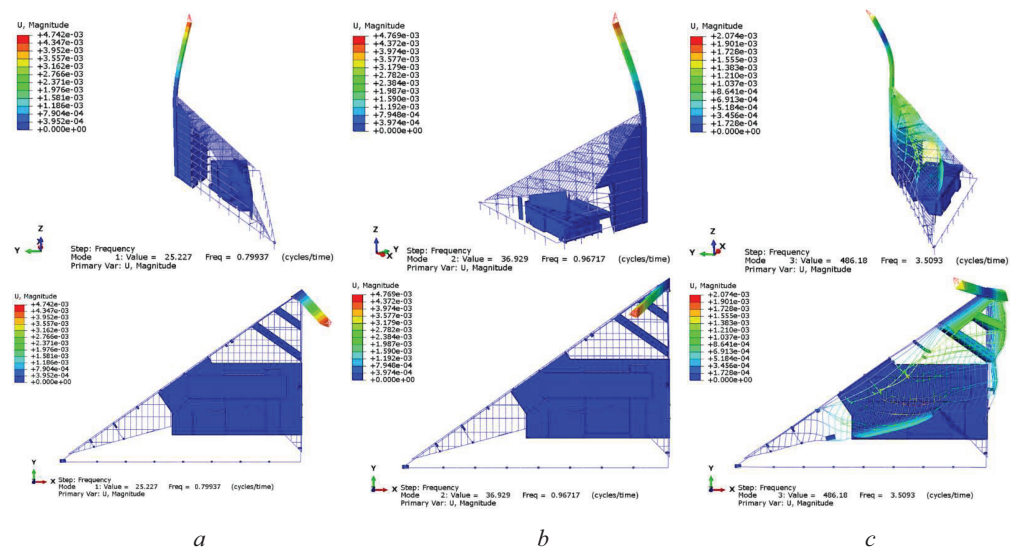


Рис. 13. Собственные формы колебаний: а — 1-я форма (0,799 Гц); б — 2-я форма (0,967 Гц); в — 3-я форма (3,509 Гц)
Fig. 13. Natural modes of oscillations: а — 1 mode (0.799 Hz); б — 2 mode (0.967 Hz); в — 3 mode (3.509 Hz)

Табл. 2. Обобщенные перемещения расчетного сечения шпиля при действии в нем заданных нагрузок
Table 2. Generalized displacements of the design section of the spire under the given loads in it

Тип нагрузки Load type	Направление действия нагрузки Load direction	Амплитуда нагрузки, Н Load amplitude, N	U_x , м / m	U_y , м / m	U_z , м / m	UR_x , рад rad	UR_y , рад rad	UR_z , рад rad
Сила Force	X	$1,00 \times 10^6$	$1,03 \times 10^{-2}$	$-1,80 \times 10^{-3}$	$-3,49 \times 10^{-4}$	$1,99 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,20 \times 10^{-4}$
Сила Force	Y	$1,00 \times 10^6$	$-1,80 \times 10^{-3}$	$7,51 \times 10^{-3}$	$-5,76 \times 10^{-4}$	$-9,10 \times 10^{-4}$	$-2,10 \times 10^{-4}$	$6,80 \times 10^{-6}$
Сила Force	Z	$1,00 \times 10^6$	$-3,49 \times 10^{-4}$	$-5,76 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-5}$	$-1,71 \times 10^{-5}$	$-2,10 \times 10^{-5}$
Момент Moment	X	$1,00 \times 10^6$	$1,99 \times 10^{-4}$	$-9,10 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-5}$	$2,28 \times 10^{-4}$	$4,36 \times 10^{-5}$	$4,13 \times 10^{-6}$
Момент Moment	Y	$1,00 \times 10^6$	$1,00 \times 10^{-3}$	$-2,10 \times 10^{-4}$	$-1,71 \times 10^{-5}$	$4,36 \times 10^{-5}$	$2,20 \times 10^{-4}$	$4,87 \times 10^{-5}$
Момент Moment	Z	$1,00 \times 10^6$	$4,20 \times 10^{-4}$	$6,80 \times 10^{-6}$	$-2,10 \times 10^{-5}$	$4,13 \times 10^{-6}$	$4,87 \times 10^{-5}$	$6,89 \times 10^{-4}$

Примечание: U_x , U_y , U_z — перемещение в направлении осей X, Y, Z; UR_x , UR_y , UR_z — поворот относительно осей X, Y, Z.
Note: U_x , U_y , U_z — movement in the direction of the X, Y, Z axes; UR_x , UR_y , UR_z — rotation relative to the X, Y, Z axes.

При решении связанной задачи в настоящем исследовании для нагрузок был принят коэффициент нижней релаксации $\alpha = 0,75$, перемещения передавались без пересчета через коэффициент нижней релаксации. Максимальное количество итераций на каждом связанном шаге (попытка FSI) было задано равным 5 для достижения критерия сходимости. Критерий сходимости для величин (перемещение и нагрузки) задан равным 10^{-3} .
Интегрирование для уравнений движения шпиля — метод Ньюмарка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Собственные частоты и формы колебаний конструкции. Жесткостные характеристики шпиля
Ниже представлены результаты модального анализа (табл. 1, рис. 13) и жесткостные характеристики шпиля (табл. 2, 3).

Оценка аэроупругой неустойчивости шпиля по нормативной методике

Согласно описаниям аэроупругих явлений можно сделать вывод о том, что для исследуемого

Табл. 3. Матрица жесткости K несущих конструкций объекта, лежащих ниже расчетного сечения шпиля
Table 3. Stiffness matrix K of the load-bearing structures of the object below the design cross-section of the spire

1	2	3	4	5	6
$9,75 \times 10^7$ Н/м N/m	$-5,54 \times 10^8$ Н/м N/m	$-2,87 \times 10^9$ Н/м N/m	$5,03 \times 10^9$ Н/рад N/rad	$9,97 \times 10^8$ Н/рад N/rad	$2,38 \times 10^9$ Н/рад N/rad
$-5,54 \times 10^8$ Н/м N/m	$1,33 \times 10^8$ Н/м N/m	$-1,74 \times 10^9$ Н/м N/m	$-1,10 \times 10^9$ Н/рад N/rad	$-4,75 \times 10^9$ Н/рад N/rad	$1,47 \times 10^{11}$ Н/рад N/rad
$-2,87 \times 10^9$ Н/м N/m	$-1,74 \times 10^9$ Н/м N/m	$2,78 \times 10^9$ Н/м N/m	$3,74 \times 10^{10}$ Н/рад N/rad	$-5,85 \times 10^{10}$ Н/рад N/rad	$-4,76 \times 10^{10}$ Н/рад N/rad
$5,03 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$-1,10 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$3,74 \times 10^{10}$ Нм/м Nm/m	$4,40 \times 10^9$ Нм/рад Nm/rad	$2,29 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad	$2,42 \times 10^{11}$ Нм/рад Nm/rad
$9,97 \times 10^8$ Нм/м Nm/m	$-4,75 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$-5,85 \times 10^{10}$ Нм/м Nm/m	$2,29 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad	$4,54 \times 10^9$ Нм/рад Nm/rad	$2,05 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad
$2,38 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$1,47 \times 10^{11}$ Нм/м Nm/m	$-4,76 \times 10^{10}$ Нм/м Nm/m	$2,42 \times 10^{11}$ Нм/рад Nm/rad	$2,05 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad	$1,45 \times 10^9$ Нм/рад Nm/rad

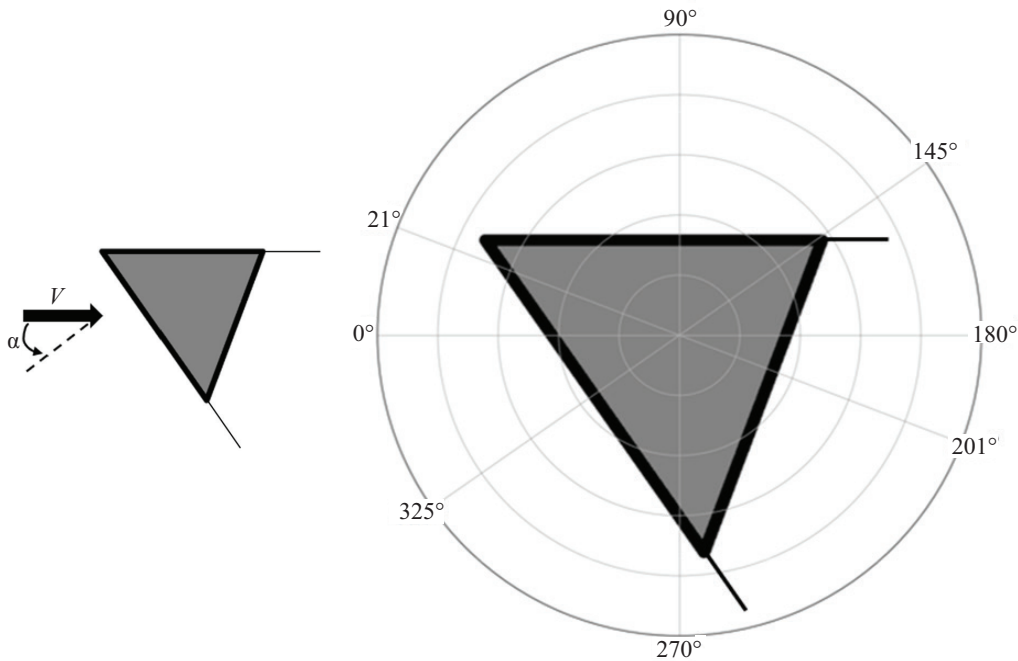


Рис. 14. Схема для пояснения критерия Ден-Гартога (V — вектор набегающего потока)
Fig. 14. Scheme to explain the Den Hartog criterion (V is the vector of the impinging flow)

шпиля возможно возникновение такого вида неустойчивости как галопирование. Для оценки возможности возникновения галопирования определяется критерий Ден-Гартога (формула (2), рис. 14). По результатам физического и численного моделирования получены аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления и подъемной (боковой) силы на шпиль (рис. 15). Далее по формуле (2) определен критерий Ден-Гартога a_g (табл. 4, рис. 16).

Число Скротона равно:

$$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho_a \cdot d^2} = 45,66, \tag{6}$$

где $m_1 = 5764,17$ кг/м — эквивалентная погонная масса; $\delta_s = 0,1$ — коэффициент конструкционного демпфирования для железобетонных конструкций согласно Eurocode; $\rho_a = 1,225$ кг/м³ — плотность воздуха; $d =$

$= 4,54$ м — характерный поперечный размер (диаметр описанной окружности вокруг треугольного сечения). В табл. 4 представлены полученные по формуле (3) значения критических скоростей возникновения галопирования ($f = 0,8$ Гц).

При этом максимально возможная скорость ветра для места строительства:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2w_0k(z)\gamma_f}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 230 \text{ Па} \cdot 2,5 \cdot 1,4}{1,225 \text{ кг/м}^2}} = 36,25 \text{ м/с}, \tag{7}$$

где $V_{\max}$ — максимально возможная скорость ветра (повторяемость — один раз в 50 лет) для шпиля на отметке 290 м.

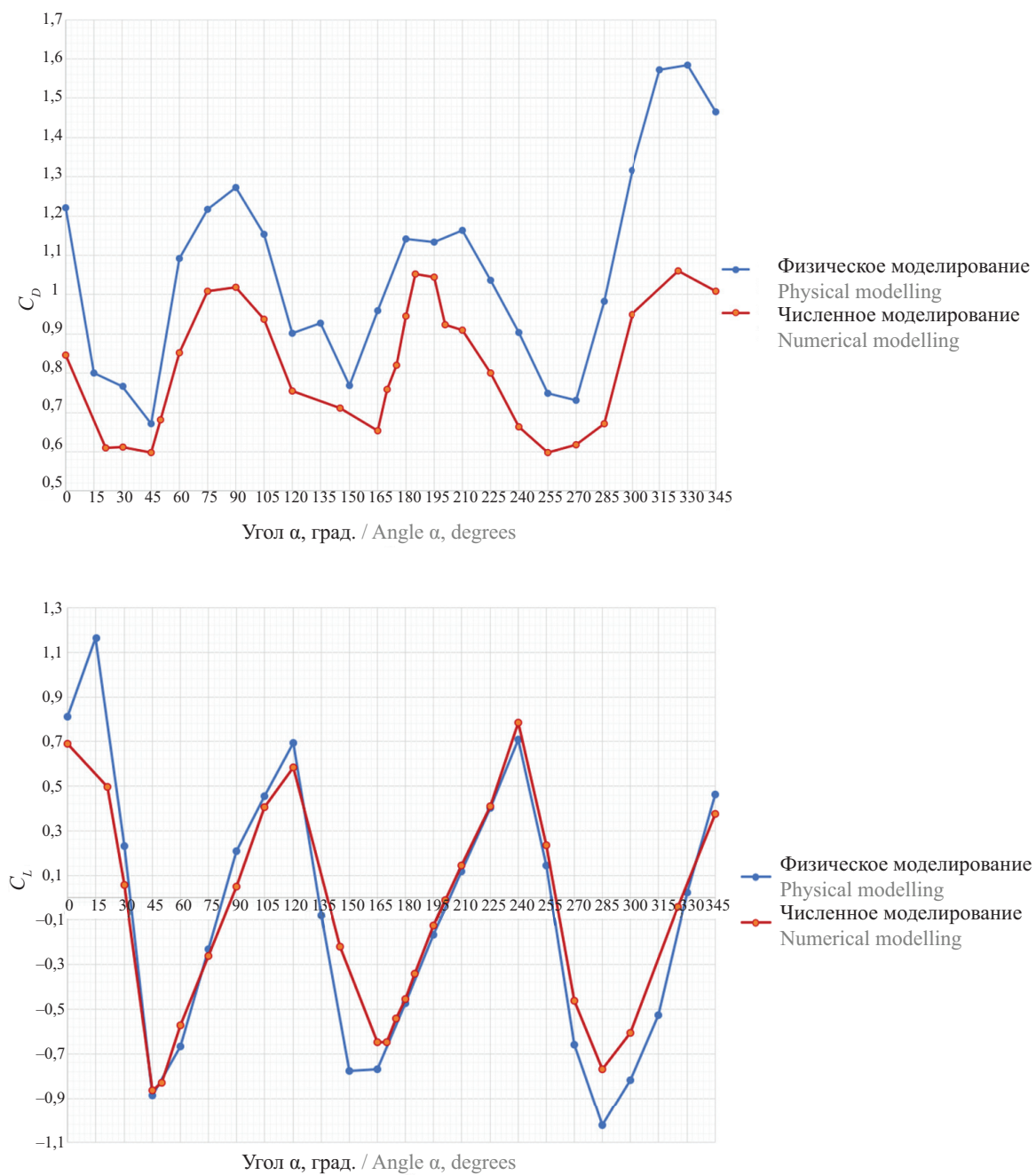


Рис. 15. Графики зависимости коэффициентов силы лобового сопротивления C_D и подъемной силы C_L от угла атаки ветра α
Fig. 15. Graphs of dependence of the coefficients of drag force C_D and lift force C_L on the angle of attack of the wind α

Табл. 4. Значения критических скоростей возникновения галопирования
Table 4. Values of critical velocity of galloping occurrence

Физическое моделирование Physical modelling			Численное моделирование Numerical modelling		
Угол α , град. / Angle α , degrees	a_g	$V_{cr.g}$, м/с / m/s	Угол α , град. / Angle α , degrees	a_g	$V_{cr.g}$, м/с / m/s
30	-2,80	94,8	30	-2,20	120,9
45	-3,61	73,6	45	-2,92	90,8
135	-2,02	131,2	145	-1,13	234,7
150	-1,90	139,8	165	-0,58	460,2
255	-1,41	188,5	255	-1,50	176,6
270	-2,34	113,3	270	-2,04	130,2
285	-0,40	665,5	285	-0,50	532,6

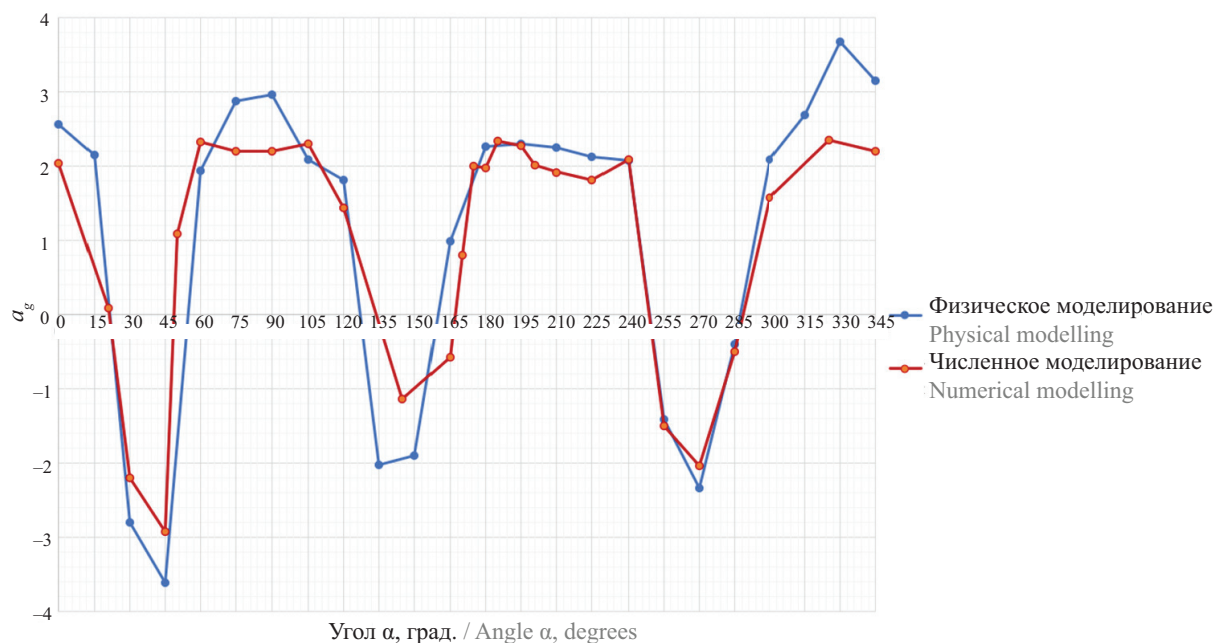


Рис. 16. График зависимости коэффициента a_g от угла атаки ветра α

Fig. 16. Graph of dependence of the coefficient a_g on the angle of attack of the wind α

Математическое (численное) моделирование аэроупругого взаимодействия шпиля с воздушным потоком

Для подтверждения полученной оценки о невозможности возникновения аэроупругой неустойчивости по нормативной методике было проведено прямое численное моделирование двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical). Расчет выполнялся для максимально возможной скорости ветра для места строительства. Рассматривался угол атаки ветра 45° (рис. 17), так как, согласно проведенной оценке на галопирование, именно для этого угла критическая скорость ветра была минимальной (табл. 4). Поскольку

большой интерес представляет динамический отклик шпиля, а также для оптимизации вычислительных ресурсов, вся конструкция (кроме шпиля) принята абсолютно жестким телом (рис. 18).

Ниже представлены полученные результаты:

- графики зависимости перемещения точки (вершины шпиля) вдоль осей x и y от времени (рис. 19);
- графики зависимости силы лобового сопротивления F_D подъемной силы F_L , действующих на шпиль, от времени (рис. 20);
- изополе общего перемещения шпиля в момент времени $t = 300$ с (рис. 21);
- изополя скоростей в горизонтальных и вертикальных плоскостях в разные моменты времени (рис. 22, 23).

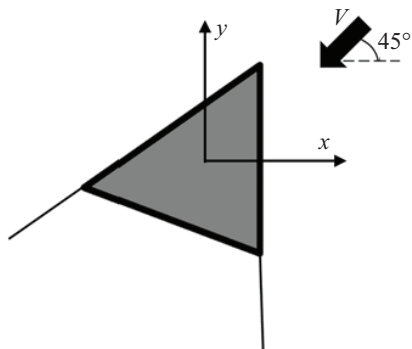


Рис. 17. Система координат и направление ветрового потока

Fig. 17. Coordinate system and wind flow direction

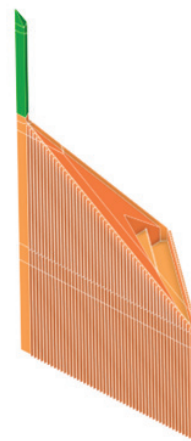


Рис. 18. Геометрическая модель

Fig. 18. Geometric model

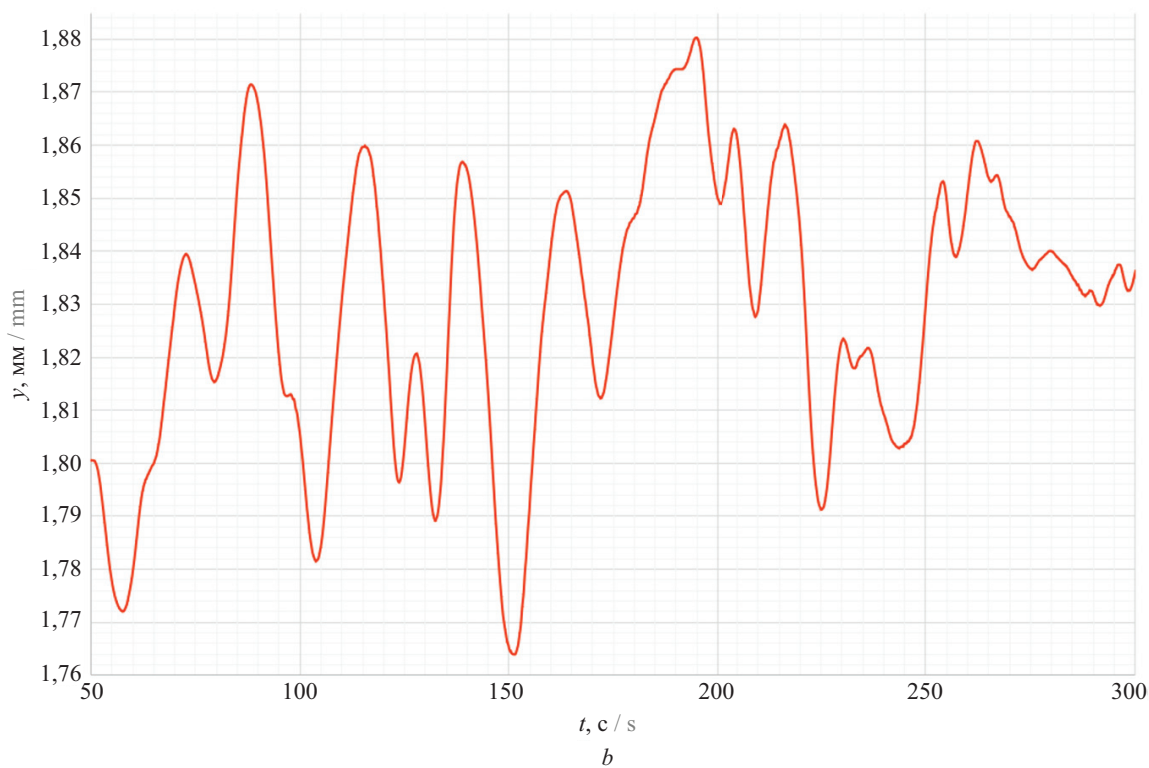
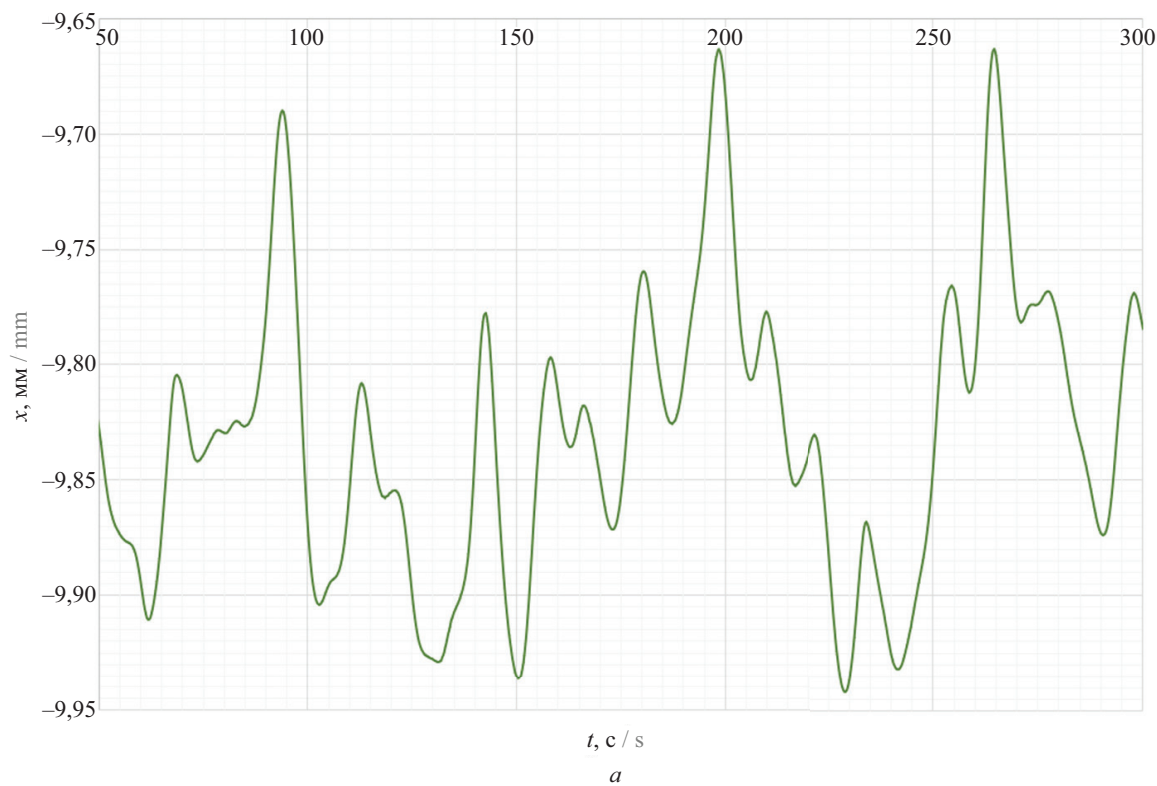


Рис. 19. График зависимости перемещения точки (вершины шпиля) от времени, мм: a — вдоль оси x ; b — вдоль оси y
Fig. 19. Graph of time dependence of point displacement (spire top), mm: a — along the x axis; b — along the y axis

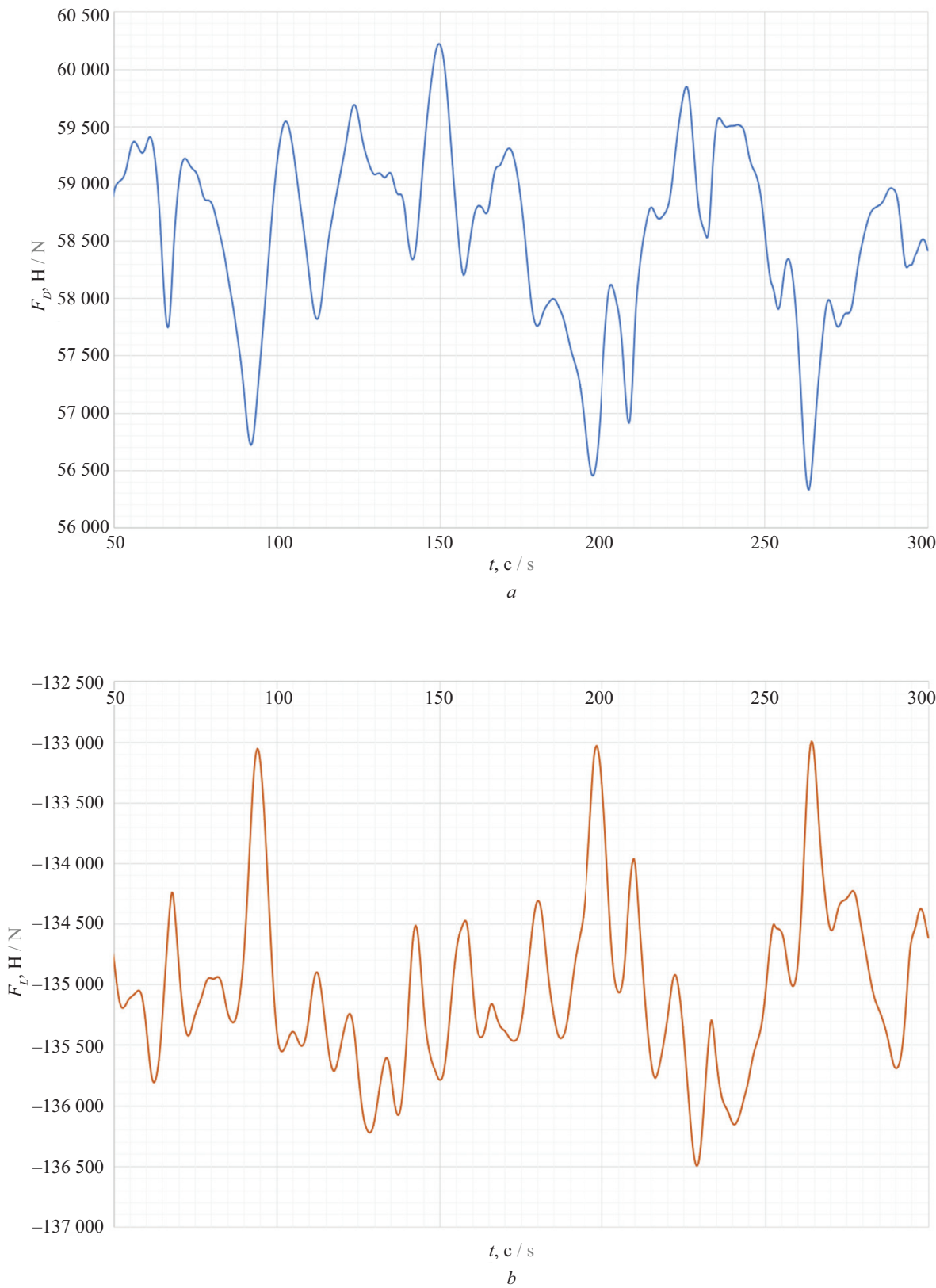


Рис. 20. Зависимость аэродинамических сил, действующих на шпиль, от времени, Н: *a* — сила лобового сопротивления F_D ; *b* — подъемная сила F_L

Fig. 20. Time dependence of aerodynamic forces acting on the spire, N: *a* — drag force F_D ; *b* — lift force F_L

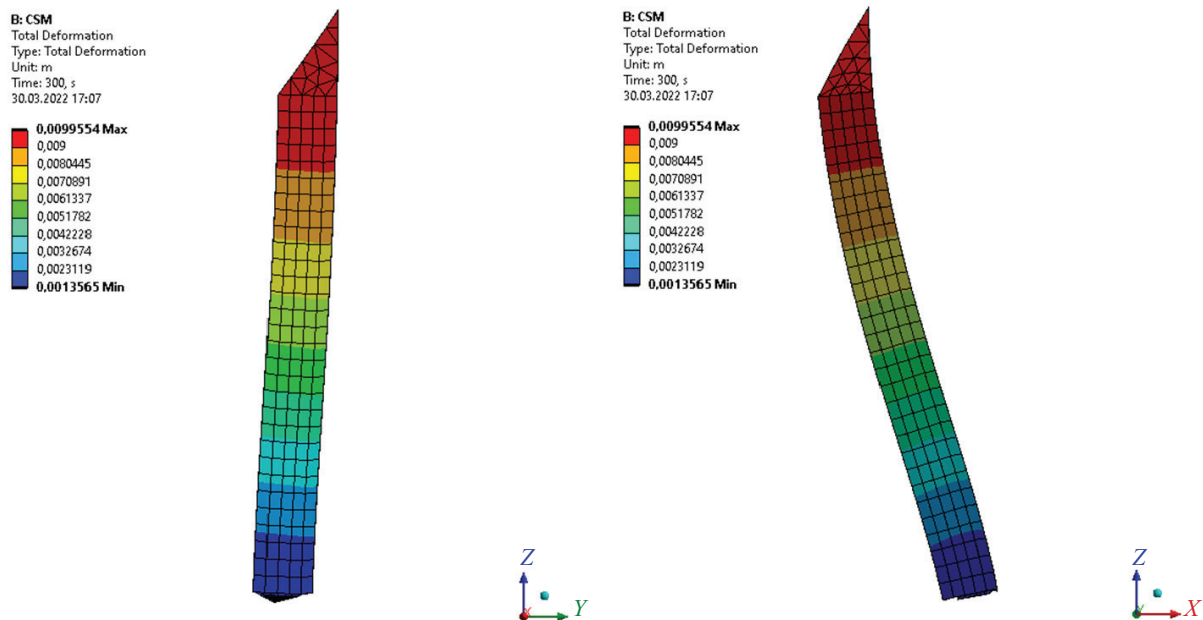


Рис. 21. Общее перемещение, м, шпиля в момент времени $t = 300$ с

Fig. 21. Total displacement, m, of the spire at time $t = 300$ s

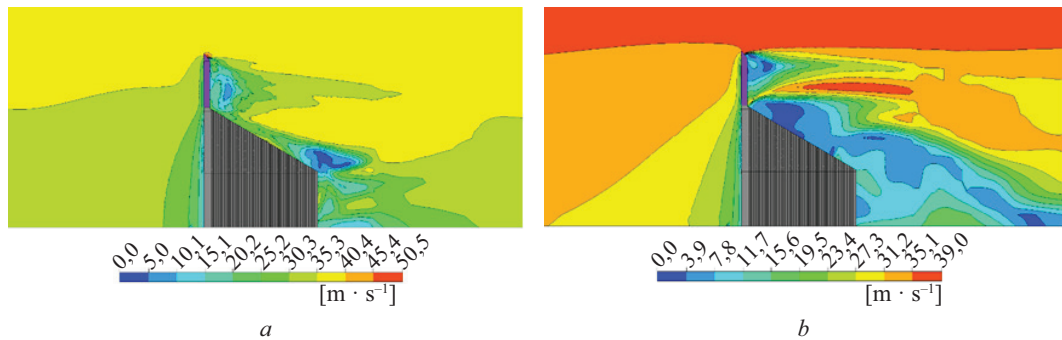


Рис. 22. Изополе скоростей, м/с, в вертикальной плоскости в разные моменты времени: $a — t = 50$ с; $b — t = 300$ с

Fig. 22. Isofield of velocity, m/s, in the vertical plane at different moments of time: $a — t = 50$ s; $b — t = 300$ s

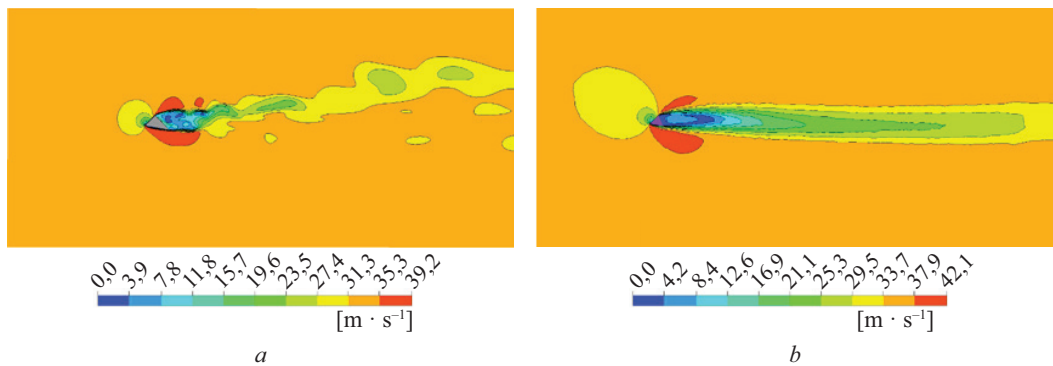


Рис. 23. Изополе скоростей, м/с, в горизонтальной плоскости на разных уровнях в момент времени $t = 300$ с: $a — 200$ м; $b — 275$ м

Fig. 23. Isofield of velocity, m/s, in the horizontal plane at different levels at time $t = 300$ s: $a — 200$ m; $b — 275$ m

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенная оценка по нормативной методике показывает, что для исследуемого шпиля невозможно возникновение явления галопирования при скоростях ветра, наблюдаемых на площадке строительства.

В результате прямого численного моделирования связанной задачи двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical) при максимально возможной

скорости ветра для места строительства для наиболее опасного направления ветра выявлено:

- перемещение шпиля не превышают 10 мм, а амплитуда колебания составляет доли миллиметра;
- в течение 300 моделируемых секунд не было обнаружено увеличения амплитуд колебаний и изменения равновесного положения шпиля.

Таким образом, поверочный двухсторонний связанный расчет аэроупругих колебаний шпиля подтвердил отсутствие явлений аэроупругой неустойчивости при максимально возможной скорости ветра для места строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Holmes J.D. Wind loading of structures. Boca Raton : CRC press, 2018.
2. Davenport A.G. The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1961. Vol. 19. Issue 4. Pp. 449–472. DOI: 10.1680/iicep.1961.11304
3. Davenport A.G. Gust Loading Factors // Journal of the Structural Division. 1967. Vol. 93. Issue 3. Pp. 11–34. DOI: 10.1061/jsdeag.0001692
4. Барштейн М.Ф. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М. : Стройиздат, 1978. 216 с.
5. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецов. М. : Стройиздат, 1984. 358 с.
6. Den-Hartog J.P. Transmission line vibration due to sleet // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1932. Vol. 51. Issue 4. Pp. 1074–1076. DOI: 10.1109/T-AIEE.1932.5056223
7. Den-Hartog J.P. Mechanical Vibrations. New York : Dover Publications, 1985. 436 p.
8. Boggs D.W., Peterka J.A. Aerodynamic model tests of tall buildings // Journal of Engineering Mechanics. 1989. Vol. 115. Pp. 618–635. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:3(618)
9. Pozzuoli C., Bartoli G., Peil U., Clobes M. Serviceability wind risk assessment of tall buildings including aeroelastic effects // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2013. Vol. 123. Issue 8. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.09.014
10. Dongmei H., Ledong Z., Quanshun D., Xue Z., Wei C. Aeroelastic and aerodynamic interference effects on a high-rise building // Journal of Fluids and Structures. 2017. Vol. 69. Pp. 355–381.
11. Wang L., Liang S., Huang G., Song J., Zou L. Investigation on the instability of vortex induced resonance of high-rise buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. Vol. 175. Pp. 17–31. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.025
12. Zheng C., Liu Z., Wu T., Wang H., Wu Y., Shi X. Experimental investigation of vortex-induced vibration of a thousand-meter-scale mega-tall building // Journal of Fluids and Structures. 2019. Vol. 85. Pp. 94–109. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.12.005
13. Wardlaw R.L., Moss G.F. A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels. CAARC, C.C.662m Tech. 1970.
14. Whitbread R.E. The measurement of non-steady wind forces on small-scale building models // Proceedings of the 4th international conference on wind effects on buildings and structures. 1977. Pp. 567–574.
15. Blackmore P.A. A comparison of experimental methods for estimating dynamic response of buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1985. Vol. 18. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/0167-6105(85)90098-4
16. Tanaka H., Lawen N. Test on the CAARC standard tall building model with a length scale of 1:1000 // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1986. Vol. 25. Pp. 15–29. DOI: 10.1016/0167-6105(86)90102-9
17. Goliger A.M., Milford R.V. Sensitivity of the CAARC standard building model to geometric scale and turbulence // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1988. Vol. 31. Pp. 105–123. DOI: 10.1016/0167-6105(88)90190-0
18. Thepmongkorn S., Wood G.S., Kwok K.C.S. Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002. Vol. 90. Issue 12–15. Pp. 1807–1815. DOI: 10.1016/s0167-6105(02)00289-1
19. Tang U.F., Kwok K.C.S. Interference excitation mechanisms on a 3DOF aeroelastic CAARC building model // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2004. Vol. 92. Issue 14. Pp. 1299–1314. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.08.004
20. Balendra T., Anwar M.P., Tey K.L. Direct measurement of wind-induced displacement in tall building models using laser positioning technique //

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2005. Vol. 93. Issue 5. Pp. 399–412. DOI: 10.1016/j.jweia.2005.03.003

21. *Hanson T., Summers D.M., Wilson C.B.* A three-dimensional simulation of wind flow around buildings // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 1986. Vol. 6. Issue 3. Pp. 113–127.

22. *Murakami S., Mochida A., Hibi K.* Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1987. Vol. 25. Pp. 291–305. DOI: 10.1016/0167-6105(87)90023-7

23. *Murakami S.* Current status and future trends in computational wind engineering // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 1997. Vol. 67. Pp. 3–34.

24. *Tominaga Y., Mochida A., Murakami S., Sawaki S.* Comparison of various revised k - ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008. Vol. 96. Issue 4. Pp. 389–411. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.01.004

25. *Blocken B., Carmeliet J., Stathopoulos T.* CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings: effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2007. Vol. 95. Pp. 941–962. DOI: 10.1016/J.JWEIA.2007.01.013

26. *Montazeri H., Blocken B.* CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis // Building and Environment. 2013. Vol. 60. Pp. 137–149. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2012.11.012

27. *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. Pp. 106747. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106747

28. *Mochida A., Murakami S., Shoji M., Ishida Y.* Numerical simulation of flowfield around Texas Tech building by large eddy simulation // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1993. Vol. 46–47. Pp. 455–460. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90312-C

29. *He J., Song C.C.S.* A numerical study of wind flow around the TTU building and the roof corner vortex // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1997. Vol. 67–68. Pp. 547–558.

30. *Selvam R.P.* Finite element modelling of flow around a circular cylinder using LES // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1997. Vol. 67–68. Pp. 129–139.

31. *Senthoooran S., Lee D.D., Parameswaran S.* A computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2004. Vol. 92. Issue 13. Pp. 1131–1145. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.07.002

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Михайлович Белостоцкий — доктор технических наук, профессор кафедры информатики и прикладной математики, научный руководитель научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова), академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; amb@stadyo.ru;

Ирина Юрьевна Негрозова — младший научный сотрудник научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; irina-lanzova@mail.ru;

Олег Сергеевич Горячевский — заместитель директора научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; osgoryachevskij@mail.ru.

Вклад авторов:

Белостоцкий А.М. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Негрозова И.Ю. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Горячевский О.С. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Holmes J.D. *Wind loading of structures*. Boca Raton, CRC press, 2018.
2. Davenport A.G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1961; 19(4):449-472. DOI: 10.1680/iicep.1961.11304
3. Davenport A.G. Gust loading factors. *Journal of the Structural Division*. 1967; 93(3):11-34. DOI: 10.1061/jsdeag.0001692.
4. Barshtein M.F. *Guidelines for the calculation of buildings and structures for the action of the wind*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 216. (rus.).
5. Simiu E., Scanlan R.H. *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984; 358. (rus.).
6. Den-Hartog J.P. Transmission line vibration due to sleet. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1932; 51(4):1074-1076. DOI: 10.1109/T-AIEE.1932.5056223
7. Den-Hartog J.P. *Mechanical Vibrations*. New York, Dover Publications, 1985; 436.
8. Boggs D.W., Peterka J.A. Aerodynamic model tests of tall buildings. *Journal of Engineering Mechanics*. 1989; 115:618-635. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:3(618)
9. Pozzuoli C., Bartoli G., Peil U., Clobes M. Serviceability wind risk assessment of tall buildings including aeroelastic effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013; 123(8). DOI: 10.1016/j.jweia.2013.09.014
10. Dongmei H., Ledong Z., Quanshun D., Xue Z., Wei C. Aeroelastic and aerodynamic interference effects on a high-rise building. *Journal of Fluids and Structures*. 2017; 69:355-381.
11. Wang L., Liang S., Huang G., Song J., Zou L. Investigation on the instability of vortex induced resonance of high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018; 175:17-31. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.025
12. Zheng C., Liu Z., Wu T., Wang H., Wu Y., Shi X. Experimental investigation of vortex-induced vibration of a thousand-meter-scale mega-tall building. *Journal of Fluids and Structures*. 2019; 85:94-109. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.12.005
13. Wardlaw R.L., Moss G.F. *A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels*. CAARC, C.C.662m Tech. 1970.
14. Whitbread R.E. The measurement of non-steady wind forces on small-scale building models. *Proceedings of the 4th international conference on wind effects on buildings and structures*. 1977; 567-574.
15. Blackmore P.A. A comparison of experimental methods for estimating dynamic response of buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1985; 18:197-212. DOI: 10.1016/0167-6105(85)90098-4
16. Tanaka H., Lawen N. Test on the CAARC standard tall building model with a length scale of 1:1000. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1986; 25:15-29. DOI: 10.1016/0167-6105(86)90102-9
17. Goliger A.M., Milford R.V. Sensitivity of the CAARC standard building model to geometric scale and turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1988; 31:105-123. DOI: 10.1016/0167-6105(88)90190-0
18. Thepmongkorn S., Wood G.S., Kwok K.C.S. Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002; 90(12-15):1807-1815. DOI: 10.1016/s0167-6105(02)00289-1
19. Tang U.F., Kwok K.C.S. Interference excitation mechanisms on a 3DOF aeroelastic CAARC building model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004; 92(14):1299-1314. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.08.004
20. Balendra T., Anwar M.P., Tey K.L. Direct measurement of wind-induced displacement in tall building models using laser positioning technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2005; 93(5):399-412. DOI: 10.1016/j.jweia.2005.03.003
21. Hanson T., Summers D.M., Wilson C.B. A three-dimensional simulation of wind flow around buildings. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 1986; 6(3):113-127.
22. Murakami S., Mochida A., Hibi K. Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1987; 25:291-305. DOI: 10.1016/0167-6105(87)90023-7
23. Murakami S. Current status and future trends in computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997; 67:3-34.
24. Tominaga Y., Mochida A., Murakami S., Sawaki S. Comparison of various revised k - ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1.2 shape placed within the surface boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008; 96(4):389-411. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.01.004
25. Blocken B., Carmeliet J., Stathopoulos T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings: effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007; 95:941-962. DOI: 10.1016/J.JWEIA.2007.01.013.
26. Montazeri H., Blocken B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis.

sis. *Building and Environment*. 2013; 60:137-149. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.11.012

27. 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

28. Mochida A., Murakami S., Shoji M., Ishida Y. Numerical simulation of flowfield around Texas Tech building by large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1993; 6-47:455-460. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90312-C

29. He J., Song C.C.S. A numerical study of wind flow around the TTU building and the roof corner vortex. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997; 67-68:547-558.

30. Selvam R.P. Finite element modelling of flow around a circular cylinder using LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997; 67-68:129-139.

31. Senthoooran S., Lee D.D., Parameswaran S. A computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004; 92(13):1131-1145. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.07.002

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on September 11, 2023.

Approved for publication on September 13, 2023.

B I O N O T E S: **Alexander M. Belostotsky** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Scientific Director of the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova, Academic of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; amb@stadyo.ru;

Irina Yu. Negrozova — Junior Researcher of the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; irina-lanzova@mail.ru;

Oleg S. Goryachevsky — Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; osgoryachevskij@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexander M. Belostotsky — scientific guidance, research concept, scientific editing of the text; final conclusions.

Irina Yu. Negrozova — materials gathering, materials analyzing, text preparation.

Oleg S. Goryachevsky — materials gathering, materials analyzing, text preparation.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014.2:624.042

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779

Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях на напряженно-деформированное состояние узла

Александр Романович Туснин, Валерия Дмитриевна Платонова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения инженерных задач интерес представляет вопрос действительной работы каркаса здания в целом с учетом особенностей работы узлов, соединяющих несущие элементы. Предлагается исследовать влияние начальных зазоров во фланцевых соединениях типа «балка – колонна» на прочностные и деформативные характеристики узлового решения. Особое внимание уделяется работе высокопрочных болтов с предварительным натяжением в режиме работы «растяжение с изгибом». Предложена конфигурация экспериментальной модели, выбран способ фиксации величины напряжений в болтах в трех точках, что позволяет учитывать напряжения не только от растяжения болта, но и от его изгиба.

Материалы и методы. Выполнен литературный обзор темы влияния начальных несовершенств во фланцевых соединениях, рассмотрен вопрос недостатков существующих подходов к аналитическому расчету узлов на основе российских и зарубежных нормативных документов. Описаны экспериментальная установка и опытные образцы, приведены рекомендации по проведению экспериментальных исследований фрагмента рамы с двумя типами узлов. Установка и образцы разработаны на основе результатов численного расчета конечно-элементных моделей.

Результаты. Проведены испытание шпильки с заявленным классом прочности 8.8 для определения ее фактических механических характеристик, испытание на растяжение шпильки с прорезями для оценки достоверности данных тензометрических измерений и корректировки конструкции экспериментальных образцов с учетом результатов испытаний, испытание узловых решений двух видов конфигураций, обработка и аналитика результатов испытаний.

Выводы. Обоснована методология выполнения эксперимента по тематике исследования, определен характер влияния формируемого зазора на напряжения в элементах узла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фланцевые соединения балки и колонны, работа фрикционного соединения при наличии зазоров

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта НИУ МГСУ. Приказ 453/130 от 15.05.2023 «О реализации проектов, поддержанных по результатам конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР) научными коллективами НИУ МГСУ».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р., Платонова В.Д. Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях на напряженно-деформированное состояние узла // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1763–1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779

Автор, ответственный за переписку: Валерия Дмитриевна Платонова, platonovaleria@yandex.ru.

Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of the unit

Alexander R. Tusnin, Valeria D. Platonova
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. For the solution of engineering problems, the question of the actual operation of the building frame as a whole, taking into account the peculiarities of the operation of the joints connecting the load-bearing elements, is of interest. It is proposed to investigate the influence of initial gaps in flange “beam – column” type connections on strength and deformation characteristics of the joint solution. Special attention is paid to the operation of high-strength bolts with pretensioning in the “tension-bending” mode of operation. In this article, the configuration of the experimental model is proposed, the method of fixing the value of stresses in bolts at three points is chosen, which makes it possible to take into account stresses not only along the axis, but also in the plane of the cross-section of the bolt.

Materials and methods. A literature review of the subject of the influence of initial imperfections in flange joints is carried out, the question of disadvantages of existing approaches to the analytical calculation of assemblies on the basis of Russian

and foreign normative documents is considered. Experimental installation and prototypes are described, recommendations for experimental studies of a frame fragment with two types of joints are given. The installation and prototypes are developed on the basis of the results of numerical calculation of finite element models.

Results. A test of a stud with the declared strength class 8.8 to determine its actual mechanical characteristics, a tensile test of a stud with slots to assess the reliability of strain gauge data and adjust the design of experimental specimens taking into account the test results, testing of joint solutions of two types of configurations, processing and analyzing the test results were carried out.

Conclusions. The methodology of experiment execution on the research subject is substantiated, the character of the influence of the formed gap on the stresses in the elements of the joint is determined.

KEYWORDS: beam-column flange joints, friction joint operation in the presence of gaps

Acknowledgments. The study was supported by a grant from NRU MGSU. Order 453/130 dated May 15, 2023 "On the implementation of projects supported by the results of the 2023 competition for fundamental and applied scientific research (R&D) by the research teams of NRU MGSU".

FOR CITATION: Tusnin A.R., Platonova V.D. Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of the unit. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1763-1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779 (rus.).

Corresponding author: Valeria D. Platonova, platonovaleria@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование стальных каркасов требует от конструктора решения таких вопросов, как прочность, жесткость, удобство сборки, расход стали и трудоемкость конструкции. Для поиска наиболее рациональных решений необходима комплексная оценка действительной работы каркаса с учетом вариативности нагрузок, перераспределения усилий в конструкции, принимая во внимание совместную работу элементов узлового соединения.

Монтаж зданий и сооружений из стали удобно выполнять на болтах различных классов прочности в зависимости требуемой несущей способности сечения стыка элементов. Наиболее интересным для рассмотрения является фланцевый рамный узел «балка – колонна». Значительный практический интерес представляют фланцевые узлы с минимальным числом дополнительных элементов. Для соединения балки и колонны из двутавровых профилей предлагается использовать два типа фланцевого узла, отличающиеся полным отсутствием поперечных ребер жесткости на колонне в районе узла (рис. 1).

В настоящее время для соединения балки с колонной широко используются типовые узлы [1–3], расчет которых задокументирован в рекомендациях и руководствах по проектированию^{1, 2, 3}. Такие узлы

хорошо изучены, но имеют сложную конструкцию, содержат избыточные элементы. Это обусловлено предпочтением, которое отдавалось использованию узлов, максимально приближенных к жесткому соединению по характеру работы. Также ведутся исследования по определению характера работы фланцевых узлов без дополнительных элементов усиления в различных конфигурациях [4–9]. В европейских странах применяется методика учета жесткостных характеристик соединения. К достоинствам методики Еврокода относится возможность учета вклада каждого отдельного конструктивного компонента в жесткость соединения, однако эта методика достаточно трудоемка для применения на практике.

В ряде научных публикаций представлены результаты исследований фланцевых узлов с учетом их жесткостных параметров [10–20]. Для определения жесткостных характеристик используются результаты расчетов конечно-элементных моделей и данные экспериментальных исследований. Вопрос начальных несовершенств обсуждается в меньшей степени, большее предпочтение отдается изучению работы соединений при разных видах динамических, термических и особых нагрузок. Также рассматриваются вопросы работы различных сталей, их достоинства и недостатки в конкретных условиях эксплуатации.

Российские и зарубежные исследования показывают, что минимальные начальные несовер-

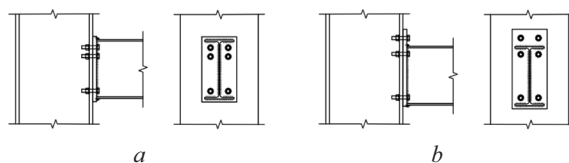


Рис. 1. Фланцевые узлы без усиления: *a* — соединение с фланцем в пределах высоты балки; *b* — соединение с удлиненным фланцем

Fig. 1. Flange units without reinforcement: *a* — connection with flange within the beam height; *b* — connection with extended flange

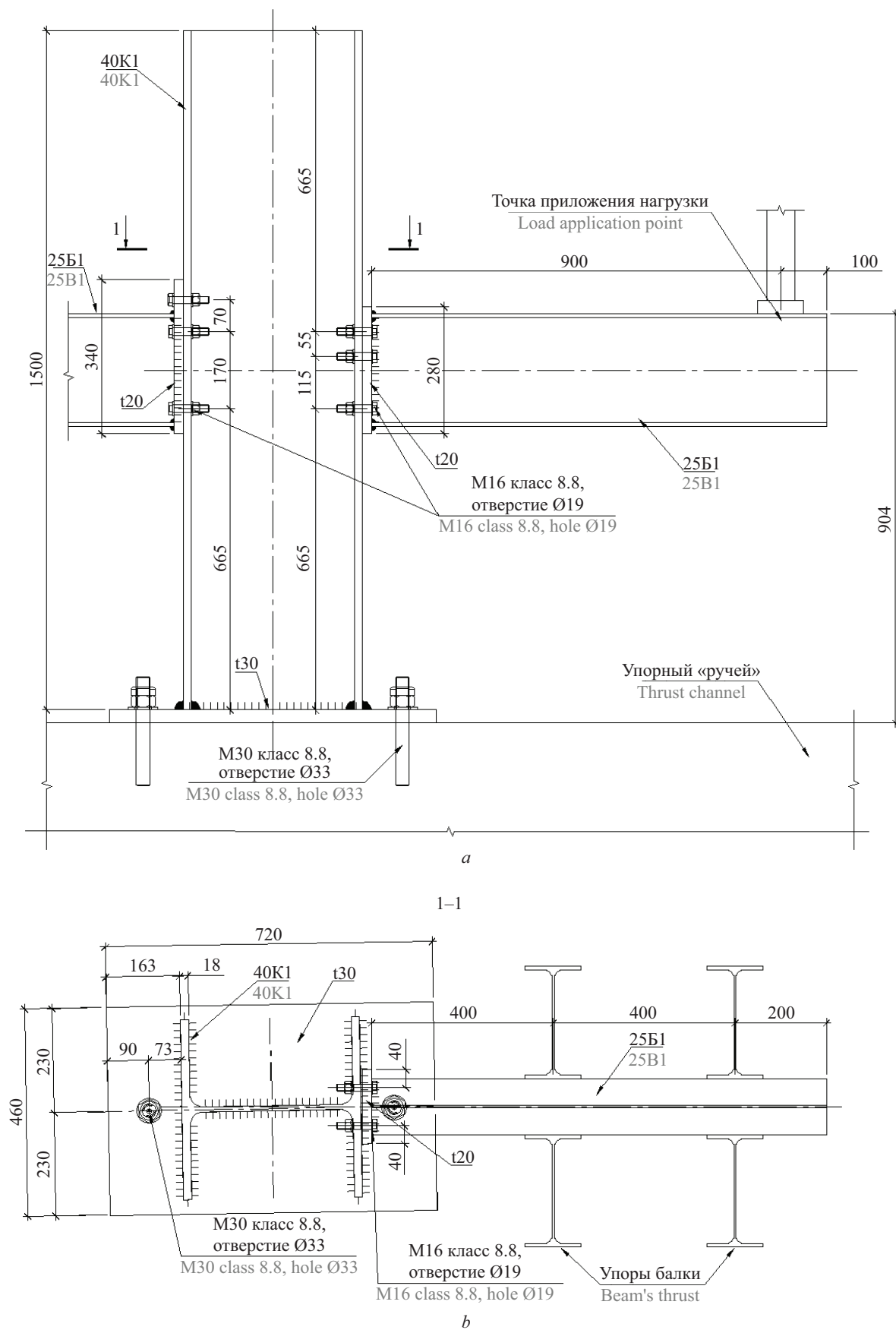


Рис. 2. Экспериментальная установка: *a* — вид сбоку; *b* — вид сверху

Fig. 2. Experimental setup: *a* — side view; *b* — top view

шенства, такие как сварочные деформации фланца, не влияют негативно на прочностные свойства соединения, снижая при этом начальную жесткость соединения. Для проектирования надежных фланцевых узлов необходимо установить, какая величина начальных зазоров во фланцах является допустимой при проектировании соединений и какой в действительности вклад она вносит в характеристики соединения.

Анализ применяемых для изготовления колонн прокатных профилей показал, что наибольшее влияние на формирование возникновения начальных зазоров между фланцем балки и полкой колонны оказывает отклонение полки прокатного профиля колонны от параллельности. По ГОСТ Р 57837–2017 при высоте профиля от 120 до 290 мм перепад плоскости полки по ее длине не должен превышать 3 мм, при высоте больше 290 мм — 4 мм. В настоящем исследовании предлагается рассмотреть непараллельность фланцев колонны и балки с раскрытием зазора в горизонтальной плоскости соединения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью определения влияния начального зазора между фланцами на напряженно-деформированное состояние (НДС) соединения проведены экспериментальные исследования работы флан-

цевых узлов «балка – колонна». Для этого была разработана методика выполнения эксперимента и сконструирована экспериментальная установка, обеспечивающая формирование узла с варьируемыми по величине зазорами.

В состав экспериментальной установки входят колонна, балки с приваренными фланцами и боковые упоры, фиксирующие положение балки относительно колонны в горизонтальной плоскости и обеспечивающие формирование требуемого зазора. С учетом ограничений по допустимой высоте при осуществлении эксперимента колонна выполняется длиной 1500 мм. Для уменьшения влияния закручивания колонны на работу узла с зазорами колонна выполняется из прокатного двутавра 40К1, имеющего большую жесткость на кручение. Экспериментальная балка изготавливается из прокатного двутавра 25Б1, из таких же профилей выполнены 4 упора. Колонна и упоры крепятся к силовому полу анкерными болтами. При проведении испытаний предполагается работа стали колонны и балки в упругой стадии, что позволило выполнить многовариантные испытания при варьировании зазора между фланцем и полкой.

Для крепления балки к колонне фланцев выбран наименьший из доступных диаметров болтов 16 мм и класс прочности 8.8. Применение класса болтов 8.8

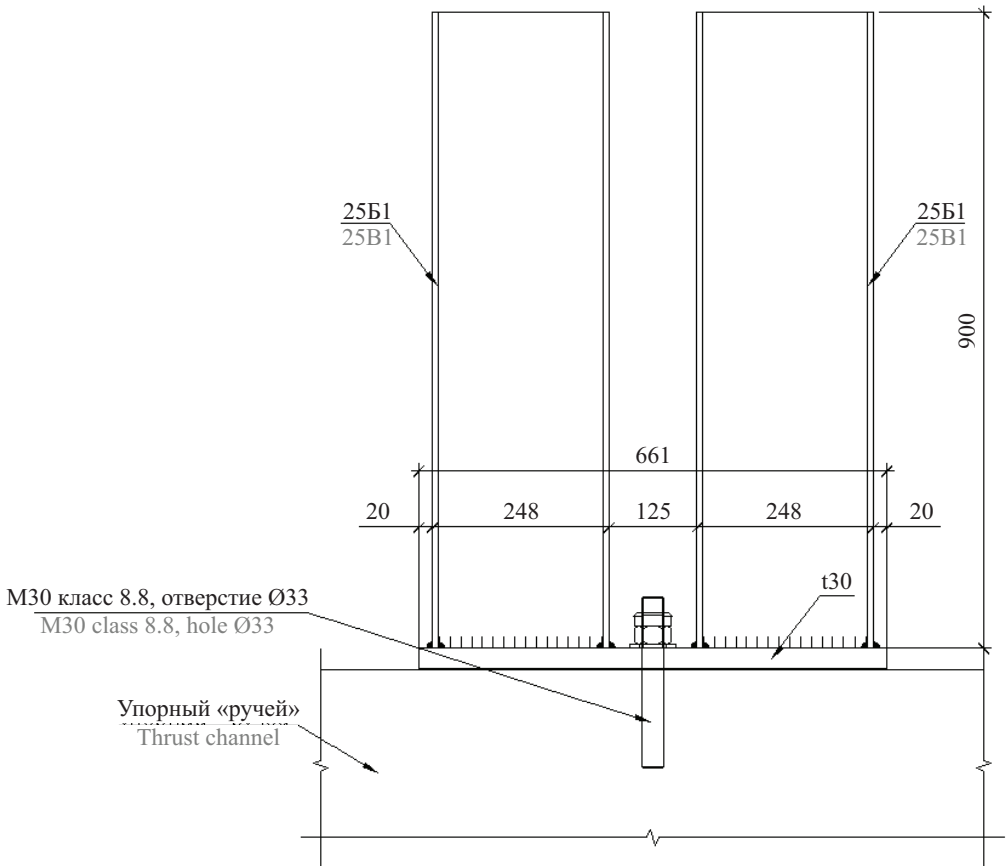


Рис. 3. Упоры балки

Fig. 3. Beam supports

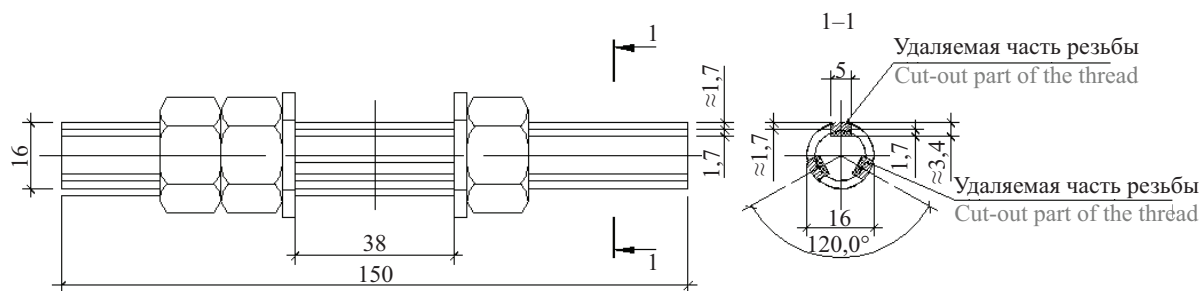


Рис. 4. Соединительная деталь с пазами для тензодатчиков

Fig. 4. Connection piece with slots for load cells



Рис. 5. Испытание шпильки с прорезями

Fig. 5. Testing a stud with slots

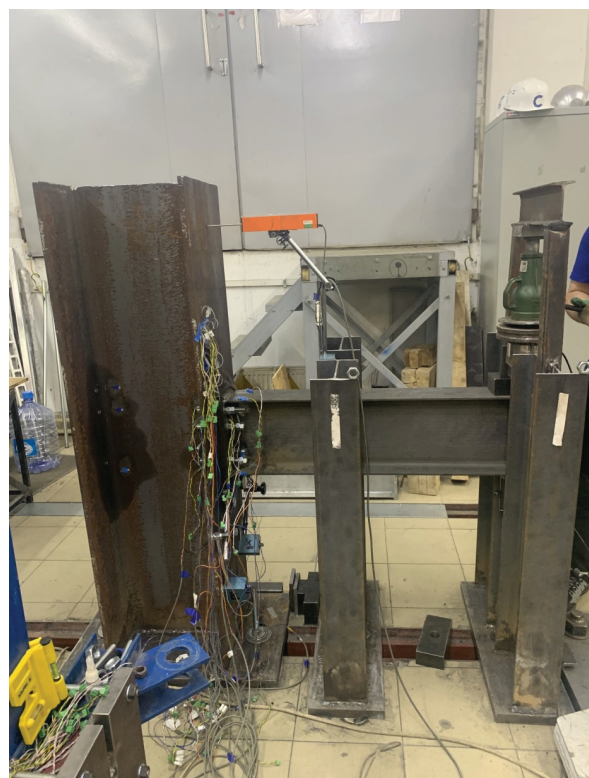


Рис. 6. Экспериментальная установка фланцевого соединения

Fig. 6. Experimental flange connection installation

во фланцевых узлах допустимо в конструкциях любых классов ответственности. Параметры болтов обеспечили работу соединения при отсутствии пластических деформаций в стыкуемых элементах. Особенностью болтового соединения являлось использование не стандартных высокопрочных болтов, шпилек класса 8.8, что позволило после соответствующей доработки разместить на шпильке тензометрические датчики для измерения деформаций болтов в процессе загрузки. Для того чтобы равномернее распределить нагрузку от преднапряжения болтов между стягиваемыми элементами толщина фланца принимается примерно равной толщине полки колонны. Полка колонны из двутавра 40К1 имеет толщину 18 мм, фланец балки принимается равным 20 мм.

Конструкция экспериментальной установки представлена на рис. 2.

При выполнении эксперимента испытаны образцы двух вышеприведенных видов узлов в следующей последовательности:

- 1) без начального зазора;
- 2) с максимальным расчетным зазором 2 мм;
- 3) с зазором, равным удвоенной величине максимального расчетного зазора 4 мм.

На рис. 3 показаны упоры, фиксирующие положение балки относительно колонны. При этом формирование зазора выполнялось с помощью поворота колонны на требуемый угол и жесткой фиксации опорной плиты колонны анкерными болтами.

Для определения деформаций болтов во фланцевом соединении была изготовлена соединительная деталь из шпильки класса прочности 8.8 диаметром 16 мм, в которой выточены пазы для крепления трех тензодатчиков с базой 3 мм и сопротивлением 120 Ом. Три датчика позволяют получить не только данные о продольной силе в болте, но и об изгибающем моменте в нем. Шпилька крепится гайками класса 8. Для фиксации положения гаек используется контргайка. Общий вид шпильки представлен на рис. 4.

Перед экспериментальными исследованиями узлов проведены испытания шпильки на растяжение для установления механических характеристик стали шпильки. Кроме этого, проведены испытания

шпилек с прорезями и наклеенными тензометрическими датчиками, что позволило уточнить величину прорезей и работоспособность предложенного способа измерения напряжений в шпильке. На рис. 5 показана шпилька с прорезями и приклеенными тензодатчиками в процессе испытания.

Нагрузка к шпилькам прикладывалась с равномерным ростом, показания с тензометрических датчиков снимались 10 раз в секунду, нагрузка прикладывалась до полного исчерпания прочности шпилек.

После испытания шпилек и уточнения их конструкции собрана и подготовлена экспериментальная установка. На рис. 6 представлена экспериментальная установка с подготовленным для испытания узлом первого из рассматриваемых типов.

При сборке установки отработаны процедуры надежной фиксации колонны и балки с формированием требуемого неравномерного зазора. После сборки было проведено пробное загрузке, подтвердившее работоспособность конструкции и расчетные предпосылки, принятые при проектировании установки. Пробное загрузке и все последующие выполнялись с использованием ручного пресса, рассчитанного на нагрузку до 10 т. С учетом пробного испытания уточнены программа и методика проведения эксперимента.

Для измерения деформаций элементов соединения на шпильках и фланцах были размещены тензометрические датчики. На рис. 7 показана нумерация болтов и расположение тензодатчиков на фланце. При этом болты под номерами 1–3 размещены со стороны с максимальным взаимным примыканием фланцев, а номера 4–6 со стороны формируемого при испытаниях зазора.

Значения напряжений в болтах принимались по средним деформациям трех датчиков, для фланца — приведенное напряжение (2D Von-Mises)

по двум датчикам, расположенным под 90° друг относительно друга:

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y)}.$$

При сборке добивались такого положения балки и колонны, чтобы при затяжке болтов с учетом деформирования фланца были обеспечены необходимые зазоры с одной стороны фланца. Для формирования зазора колонна поворачивалась относительно продольной оси на необходимый угол, после чего фиксировалась анкерными болтами к силовому полу. Зазоры измерялись набором машиностроительных шупов с пластинами 0,05–1 мм. При сборке установки балка предварительно фиксировалась относительно колонны, а затем закреплялась шпильками, которые затягивались с контролем относительных деформаций в датчиках. При затяжке шпилек усилие в них контролировалось так, чтобы не превысить расчетное значение затяжки, равное:

$$P_b = 0,6 \cdot R_{bt} \cdot A_{bn} = 0,6 \cdot 451 \text{ Н/мм}^2 \cdot 1,05 \text{ см}^2 = 28 \text{ кН}.$$

Экспериментально исследовалась работа узлов 1-го и 2-го типа с зазорами. В данной статье приведены результаты испытаний узла 1-го типа. Испытания узла 1-го типа проведены при трех вариантах зазора, сформированного в районе болтов номер 4–6:

- 1-е испытание — зазор величиной 1 мм;
- 2-е испытание — зазор величиной 1,8 мм;
- 3-е испытание — зазор величиной 4,7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении испытаний по определению механических свойств образца шпильки были получены следующие результаты (табл. 1, 2, рис. 8, 9).

На рис. 8 показана зависимость «деформация – нагрузка», полученная при испытании шпильки на растяжение. На диаграмме отмечены предел текучести и временное сопротивление.

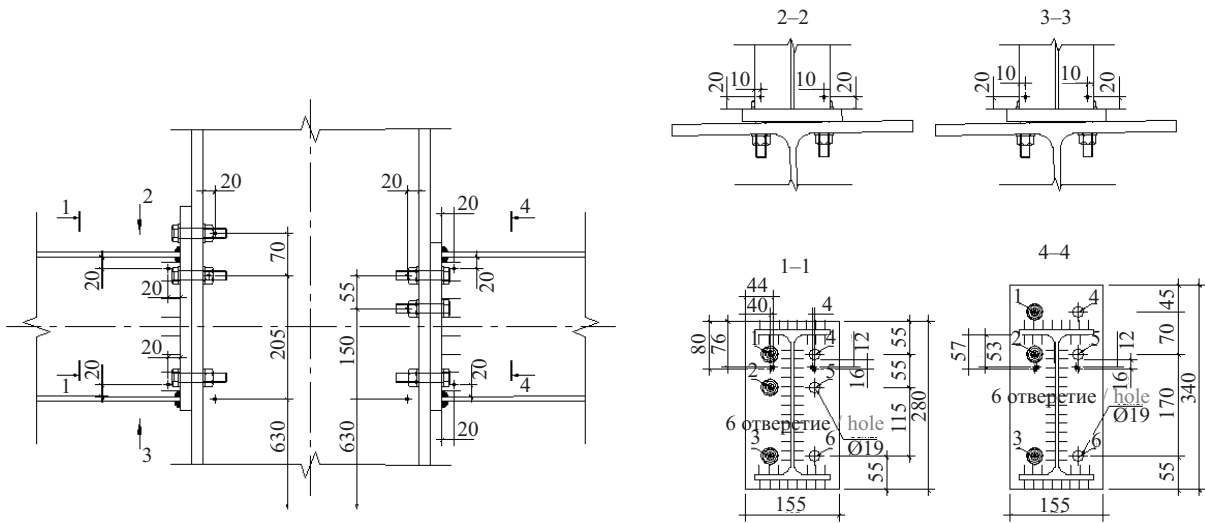


Рис. 7. Расположение тензодатчиков на фланце и нумерация болтов

Fig. 7. Location of load cells on the flange and numbering of bolts

Табл. 1. Механические свойства стали шпильки
Table 1. Mechanical properties of stud steel

Фактическая площадь сечения шпильки, мм ² Actual cross-sectional area of the stud, mm ²	Усилие появления предела текучести, кН Yield strength occurrence force, kN	Предел текучести, Н/мм ² Yield strength, N/mm ²	Нормируемое расчетное сопротивление болтов кл. 8.8, Н/мм ² Normalized design resistance of 8.8 class bolts, N/mm ²	Предельное усилие, кН Force limit, kN	Временное сопротивление образца на растяжение, Н/мм ² Tensile strength of the specimen, kN/mm ²	Нормируемое временное сопротивление болтов кл. 8.8, Н/мм ² Standardized time resistance of 8.8 class bolts, N/mm ²
104,7	59,64	569,5	451	93,39	891,0	830

Табл. 2. Нагрузка и напряжения в датчиках
Table 2. Load and stresses in the sensors

Нагрузка и напряжение Load and stress	Усилие появления предела текучести 59,64 кН Yield stress occurrence force 59.64 kN	Предельное усилие 93,39 кН Maximum force 93.39 kN
Датчик № 1 / Sensor No. 1		
Относительная деформация Relative deformation	0,002835	0,004243
Напряжение, МПа Stress, MPa	575,5	861,3
Датчик № 2 / Sensor No. 2		
Относительная деформация Relative deformation	0,001998	0,003810
Напряжение, МПа Stress, MPa	405,6	773,4
Датчик № 3 / Sensor No. 3		
Относительная деформация Relative deformation	0,002788	0,004217
Напряжение, МПа Stress, MPa	566,0	856,1
Среднее значение по датчикам № 1 и 3 / Average value for sensors No. 1 and 3		
Относительная деформация Relative deformation	0,002812	0,004230
Напряжение, МПа Stress, MPa	570,8	858,7

При определении механических характеристик стали шпилек установлено соответствие стали шпилек нормативным требованиям. Модуль упругости материала шпильки до предела текучести составил $2,03 \cdot 10^5$ МПа.

В табл. 2 представлены результаты испытания шпильки с прорезями на растяжение.

На рис. 9 приведены зависимости напряжений и нагрузки в процессе испытаний шпильки. Кроме данных по датчикам, на графике представлены зависимости напряжений, полученные делением нагрузки на площадь шпильки (обозначены как N/A).

Испытания образца шпильки с прорезями позволило установить характер разрушения. В результате нагружения экспериментального образца

соединение потеряло несущую способность по материалу резьбы гайки класса 8 со смятием шайбы кл. 5.4 (рис. 10).

Материал шпильки с учетом ослабленного пазами сечения соответствует нормируемым показателями расчетного сопротивления болтов класса 8.8 и не был разрушен в ходе испытания. Показания датчиков № 1 и 3 совпадают с теоретическими значениями. Для датчика № 2 наблюдается отклонение значений от теоретических, что обусловлено некорректной работой датчика. Испытания шпильки подтвердили работоспособность датчиков в прорезях шпилек. Показания датчиков адекватно отражают усилие, действующее в шпильке. Предварительная расклейка и распайка тензометрических датчи-

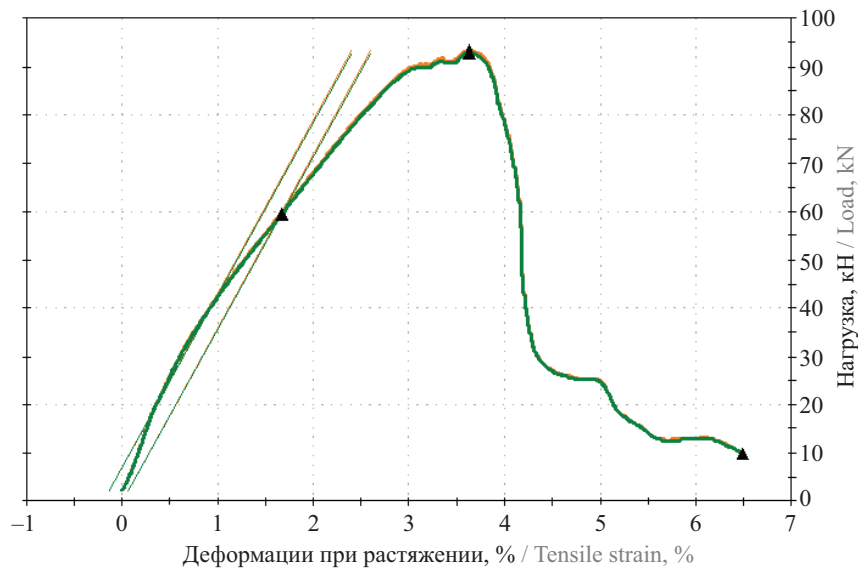


Рис. 8. Общий график «деформация – нагрузка» с обозначением характерных точек нагрузки текучести и временного сопротивления

Fig. 8. General strain – load diagram with characteristic points of yield stress and time resistance marked

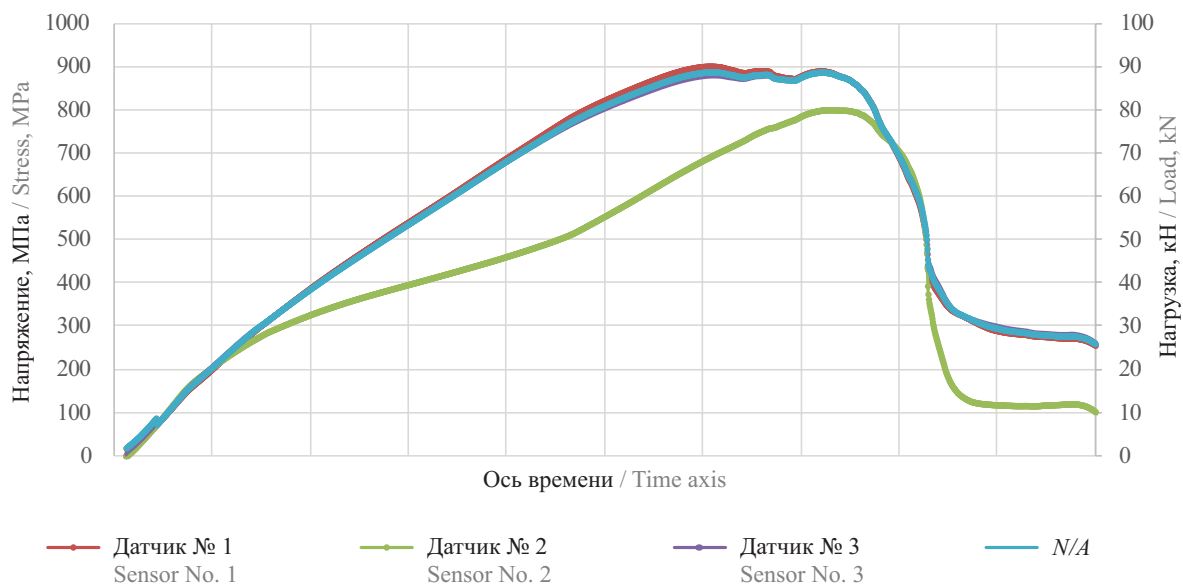


Рис. 9. График теоретического и фактического напряжения в датчиках

Fig. 9. The diagram of theoretical and fact tension in strain gages



Рис. 10. Шпилька после испытания и разрушения гайки

Fig. 10. Stud after testing and nut fracture

ков, сборка резьбового соединения и закрепления проводов датчиков, испытания шпильки дали возможность установить, что допустимо уменьшить глубину паза в шпильке для размещения датчиков до 3,4 мм. Так как разрушение произошло по материалу резьбы гайки, в дальнейших испытаниях фланцевых узлов используются контргайки с каждой стороны соединения.

В первом испытании болты затягивались на усилие 24–28 кН (табл. 3).

Разность в натяжении обусловлена перераспределением усилия натяжения между болтами при их последовательной затяжке и корректировке усилия.

Табл. 3. Предварительное натяжение в болтах, первое испытание

Table 3. Pre-tensioning in bolts, first test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Усилие натяжения, кН Tension force, kN	27,7	28,5	27,3	23,9	25,7	25,6
Начальное напряжение, кН Initial stress, kN	263,8	271,4	260,0	227,6	244,8	243,8

Максимальное сосредоточенное усилие на консоль балки на расстоянии 900 мм от фланца при первом испытании составило 35 кН. Максимальная нагрузка устанавливалась по факту достижения одним из болтов напряжения порядка 400 МПа при нормируемом значении на разрыв для болтов класса 8.8, равного 451 МПа. Разгрузка была проведена без выдержки. На рис. 11 представлено изменение напряжений в болтах в зависимости от нагрузки. Красным цветом показано изменение нагрузки, синим — напряжения в элементах.

В табл. 4 приведены напряжения в болтах до и после первого испытания.

По приведенным выше диаграммам видно, что болты верхних рядов в зоне плотного примыкания фланцев (№ 1, 2) сохраняют значения внутреннего напряжения на уровне значения предварительной затяжки до некоторой величины нагрузки (около 28 кН), после чего в них резко начинают расти напряжения сверх преднатяжения. Усилия в болтах № 4 и 5 нарастают сразу и увеличиваются пропорционально росту нагрузки на балку. Отсутствие роста

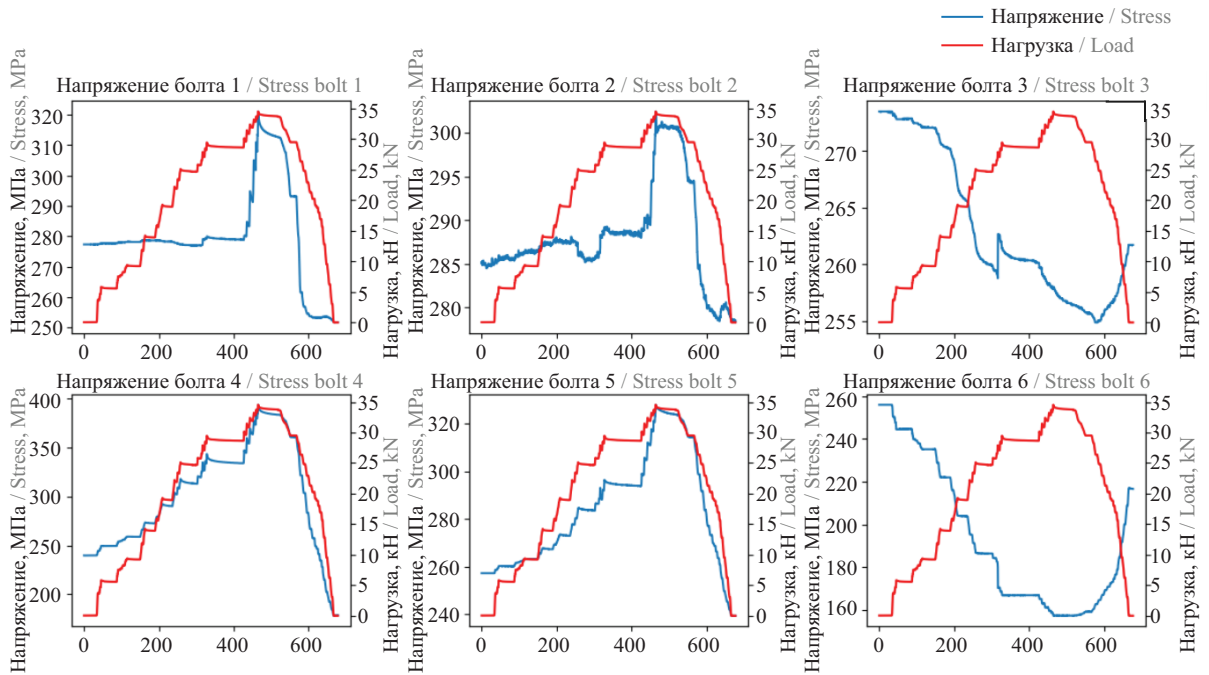


Рис. 11. Напряжения в болтах, первое испытание

Fig. 11. Bolt stresses, first test

Табл. 4. Напряжения в болтах до и после испытания, первое испытание

Table 4. Bolt stresses before and after test, first test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Предварительное напряжение, МПа Pre-stress, MPa	263,8	271,4	260,0	227,6	244,8	243,8
Напряжение при максимальной нагрузке, МПа Stress at maximum load, MPa	322,5	303,9	274,8	395,7	329,4	257,3
Остаточное напряжение, МПа Residual stress, MPa	252,9	279,8	262,9	179,7	240,6	217,7

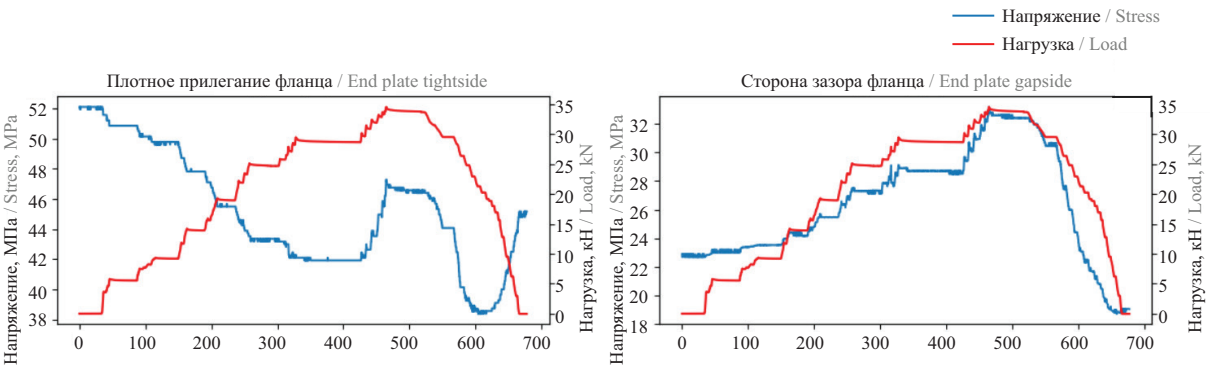


Рис. 12. Напряжения во фланце, первое испытание

Fig. 12. Flange stresses, first test

усилий в болтах 1 и 2 на начальном этапе загрузки обусловлено тем, что контакт фланца с полкой колонны в районе плотного примыкания сохраняется до достижения нагрузкой величины 28 кН и условия работы болтов близки к их начальному состоянию. При большей нагрузке контакт фланца и полки в районе болтов 1 и 2 нарушается, фланец не соприкасается с полкой, все сжимающие напряжения в полке и фланце в направлении толщины снимаются, а болты 1 и 2 дополнительно растягиваются при росте нагрузки. Усилия в болтах № 1 и 2 после этого достигают значений, соответствующих усилиям в болтах 4 и 5, изначально работающих в условиях отсутствия контакта фланца и полки. Рост напряжений в болтах при действии максимальной нагрузки составил от 12 до 74 % (болт № 2 и 4 соответственно). После разгрузки напряжения в болтах растянутой зоны уменьшаются от 2 до 21 % (болт № 5 и 4 соответственно). Исключением служит болт № 2, напряжение в котором увеличилось в сравнении с начальным состоянием на 3 %.

Нижний ряд болтов находится в сжатой зоне узла. С ростом нагрузки напряжения растяжения в них, как и ожидалось, падают с ростом нагрузки. У болта № 3 в диапазоне нагрузки 25–28 кН в цикле нагружения имеет место характерный участок смены знака изменения напряжения. При этом падение предварительного натяжения со стороны плотного примыкания (болт № 3) составило 18,6 МПа, а со стороны зазора (болт № 6) — 98,9 МПа. После разгрузки снижение напряжений в болте сжатой зоны № 6 составило 11 %, для болта № 3 напряже-

ние увеличилось на 1 % в сравнении с начальным значением.

На рис. 12 показаны зависимости напряжений во фланце при изменении нагрузки.

Первый график отображает напряжения со стороны плотного прилегания фланца к полке, второй — со стороны сформировавшегося зазора. В начальный момент времени приведенное напряжение от затяжки болтов в зоне плотного примыкания составило 52,1 МПа, в зоне зазора — 22,7 МПа. При увеличении нагрузки наблюдается снижение приведенных напряжений в зоне плотного примыкания фланца к полке до 42 МПа при нагрузке 28 кН, затем напряжения возрастают до 47 МПа при достижении максимальной нагрузки. Дополнительный рост напряжений в зоне плотного примыкания фланца к полке возникает при той же нагрузке, что и рост напряжений в болтах этой зоны. В зоне зазора напряжения растут по мере роста нагрузки во всем диапазоне нагружения.

С учетом результатов первого испытания было подготовлено второе. Натяжение болтов производилось с контролем остаточной величины сформированного зазора. Величина зазора во втором испытании составила 1,8 мм. Из-за податливости упора деформаций фланца и полки колонны болты со стороны зазора имели значительно меньшую величину натяжения, чем болты со стороны плотного примыкания (табл. 5).

При натяжении болтов на указанные в табл. 4 усилия остаточные зазоры со стороны более плотного прилегания фланцев составили 1 мм в зоне

Табл. 5. Предварительное натяжение в болтах, второе испытание

Table 5. Pre-tensioning in bolts, second test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Усилие натяжения, кН Tension force, kN	24,9	23,8	27,0	5,2	8,7	11,7
Начальное напряжение, кН Initial stress, kN	237,1	226,7	257,1	49,5	82,9	111,4

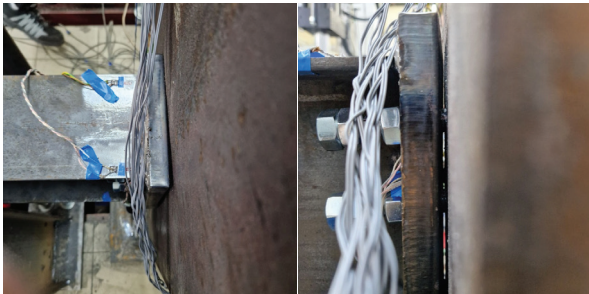


Рис. 13. Зазор 1,8 мм, второе испытание

Fig. 13. Gap 1.8 mm, second test

расположения болтов, со стороны формируемого зазора — 1,8 мм (рис. 13).

Нагрузка прикладывалась аналогично первому эксперименту с шагом 5 кН и кратковременной выдержкой. Максимальное значение нагрузки принималось по достижению относительных деформаций одного из болтов значений, соответствующих

ших напряжению в болте, равному нормируемому сопротивлению 450 МПа. Предельное значение нагрузки — 40 кН. Разгрузка при этом проводилась ступенчато по 5 кН, так же, как и нагружение. На рис. 14 представлена зависимость напряжений в болтах при изменении нагрузки.

В табл. 6 приведены напряжения в болтах до и после первого испытания.

При действии нагрузки 40 кН напряжения в болтах достигли порядка 440 МПа. В болтах № 1, 2 до нагрузки 16 кН усилия менялись мало. После достижения нагрузкой этого значения контакт между фланцем и полкой нарушался и болты 1 и 2 дополнительно растягиваются так же, как и болты в зоне зазора. Наличие для болтов № 1 и 2 участка с мало меняющимися напряжениями до нагрузки 14 кН свидетельствует о наличии контакта между фланцем и полкой непосредственно в районе этих болтов, несмотря на зазоры по краю фланца до 1 мм. Напряжения в болтах при действии максимальной нагрузки

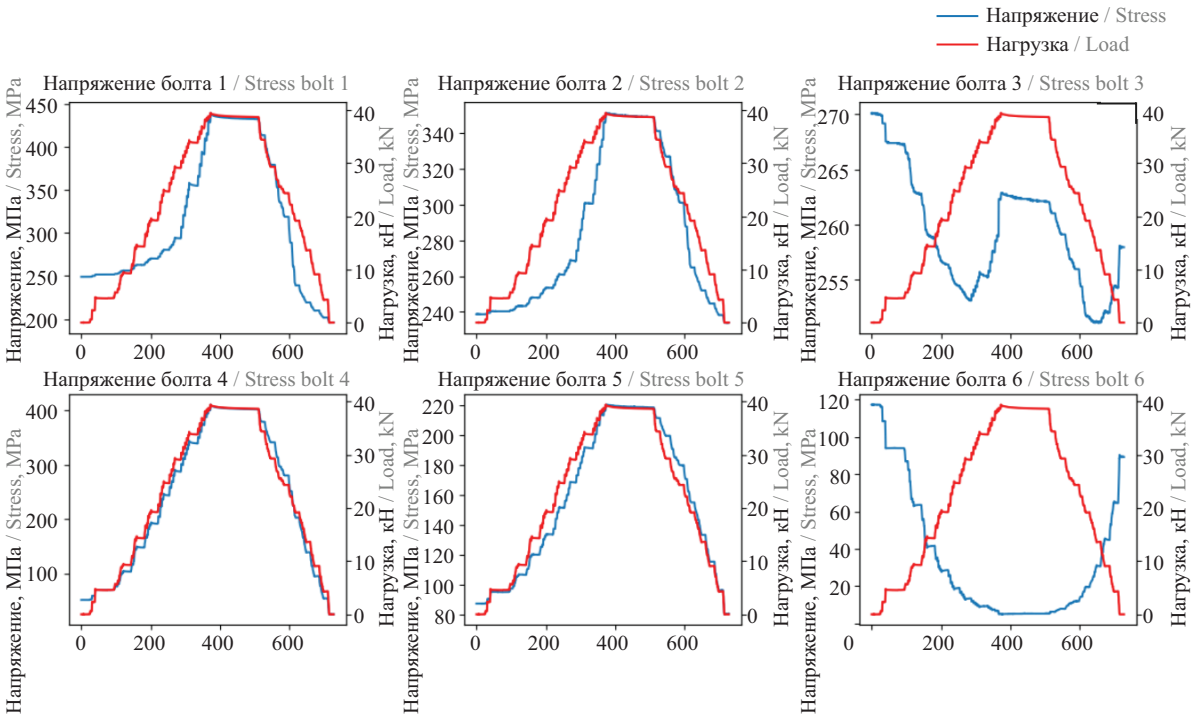


Рис. 14. Напряжения в болтах, второе испытание

Fig. 14. Bolt stresses, second test

Табл. 6. Напряжения в болтах до и после испытания, второе испытание

Table 6. Bolt stresses before and after test, second test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Предварительное напряжение, МПа Pre-tension, MPa	237,1	226,7	257,1	49,5	82,9	111,4
Напряжение при максимальной нагрузке, МПа Stress at maximum load, MPa	441,5	352,9	271,4	412,0	221,4	5
Остаточное напряжение, МПа Residual stress, MPa	197,1	235,2	259,2	25,8	81,3	89,6

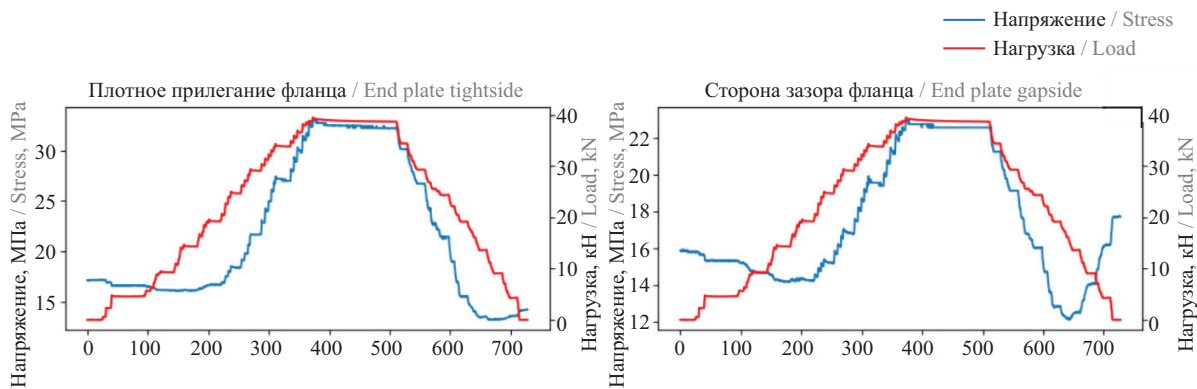


Рис. 15. Напряжения во фланце, второе испытание

Fig. 15. Flange stresses, second test

Табл. 7. Предварительное натяжение в болтах, третье испытание

Table 7. Pre-tensioning in bolts, third test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Усилие натяжения, кН Tension force, kN	17,9	14,7	13,0	12,7	12,5	14,3
Начальное напряжение, кН Initial stress, kN	170,5	140,0	123,8	121,0	119,0	136,2

значительно увеличились в 1,56–7,32 раза (болт № 2 и 4 соответственно). При этом большой рост напряжений в болте № 4 обусловлен малым значением преднатяжения на этапе, предшествующем приложению нагрузки на балку. После разгрузки напряжения в болтах растянутой зоны уменьшаются на 2–48 % (болт № 5 и 4 соответственно) по сравнению с начальным натяжением. Исключение составляет болт № 2, напряжение в котором увеличилось в сравнении с начальным состоянием на 4 %.

Так же, как и в первом эксперименте, прирост напряжений в болтах № 4, 5 со стороны зазора 1,8 мм практически совпадает с изменением нагрузки на балку. Болт № 3 аналогично первому испытанию имеет характерный участок смены направления роста напряжения, при этом более выраженный. Как и в первом испытании напряжения в болте № 3 уменьшаются в меньшей степени, чем в болте № 6. Так, напряжения в болте № 3 снизились при максимальной нагрузке на 3 %, а в болте № 6 произошло полное падение величины преднатяжения до нуля. После разгрузки снижение напряжений в болте № 6 сжатой зоны составило 20 %, для болта № 3 напряжение увеличилось на 1 % в сравнении с начальным значением.

На рис. 15 показаны зависимости напряжений во фланце при изменении нагрузки.

Для фланца характерно отсутствие снижения приведенного напряжения в обеих группах датчиков в сравнении с первым испытанием, так как по обе стороны болтов был сформирован зазор с раскрытием более 1 мм.

Третье испытание проведено с самым большим зазором с одной стороны фланца 4,7 мм. При этом с другой стороны на некоторых участках зазор составил до 1,4 мм. При сборке конструкции и формировании зазора были достигнуты следующие усилия предварительного натяжения в болтах (табл. 7).

Зазоры, сформированные во фланцевом соединении при проведении третьего испытания, показаны на рис. 16.



Рис. 16. Зазор 4,7 мм, третье испытание

Fig. 16. Gap 4.7 mm, third test

Табл. 8. Напряжения в болтах до и после испытания, третье испытание

Table 8. Bolt stresses before and after test, third test

Номер болта Number of bolt	1	2	3	4	5	6
Предварительное напряжение, МПа Pre-stress, MPa	170,5	140,0	123,8	121,0	119,0	136,2
Напряжение при максимальной нагрузке, МПа Stress at maximum load, MPa	525,9	228,2	0	412,0	37	0
Остаточное напряжение, МПа Residual stress, MPa	148,0	148,8	102,1	25,8	111,3	89,6

Нагрузка прикладывалась аналогично первому эксперименту с шагом 5 кН и кратковременной выдержкой. Предельное значение нагрузки — 30 кН. Разгрузка при этом проводилась ступенчато по 5 кН, так же, как и нагружение.

В табл. 8 и на рис. 17 представлены напряжения в болтах до и после третьего испытания.

Наличие зазора в районе болта № 1 привело к тому, что с самого начала загрузки балки напряжения в нем растут одновременно с ростом нагрузки. В районе болта № 2 имелся контакт фланца с полкой, поэтому он работает так же, как и в предшествующих испытаниях. Из-за большого зазора болт № 5 работает, как болт, расположенный в сжатой моментом зоне фланца. Это свидетельствует о неблагоприятном изменении характера работы соединения. Сжатая зона фланца увеличилась, она стала явно несимметричной, уменьшилось плечо пары сил между центром тяжести растянутых болтов и центром тяжести сжатой зоны фланца, а сама

пара сил стала работать не в вертикальной плоскости. Следствием таких неблагоприятных изменений стало уменьшение нагрузки до 30 кН при достижении предельных напряжений. Для болтов, в которых наблюдалось снижение преднатяжения, разность между начальным и конечным значением составила 7,3 кН для болта № 3, 2; 8 кН для болта № 5; 94,7 кН для болта № 6. В процессе испытания рост напряжений в болтах № 1, 2, 4 при действии максимальной нагрузки составил 208, 63 и 240 % соответственно. В болтах № 3, 6 произошло полное падение напряжений до нуля при действии максимальной нагрузки. В болте № 5 падение напряжений составило 69 %. После разгрузки напряжения во всех болтах, кроме болта № 2, уменьшились на 6–41 %. В болте № 2 напряжение увеличилось на 6 %.

На рис. 18 показаны зависимости напряжений во фланце при изменении нагрузки.

Развитие напряжений во фланце со стороны зазора происходит быстрее, чем в предыдущих ис-

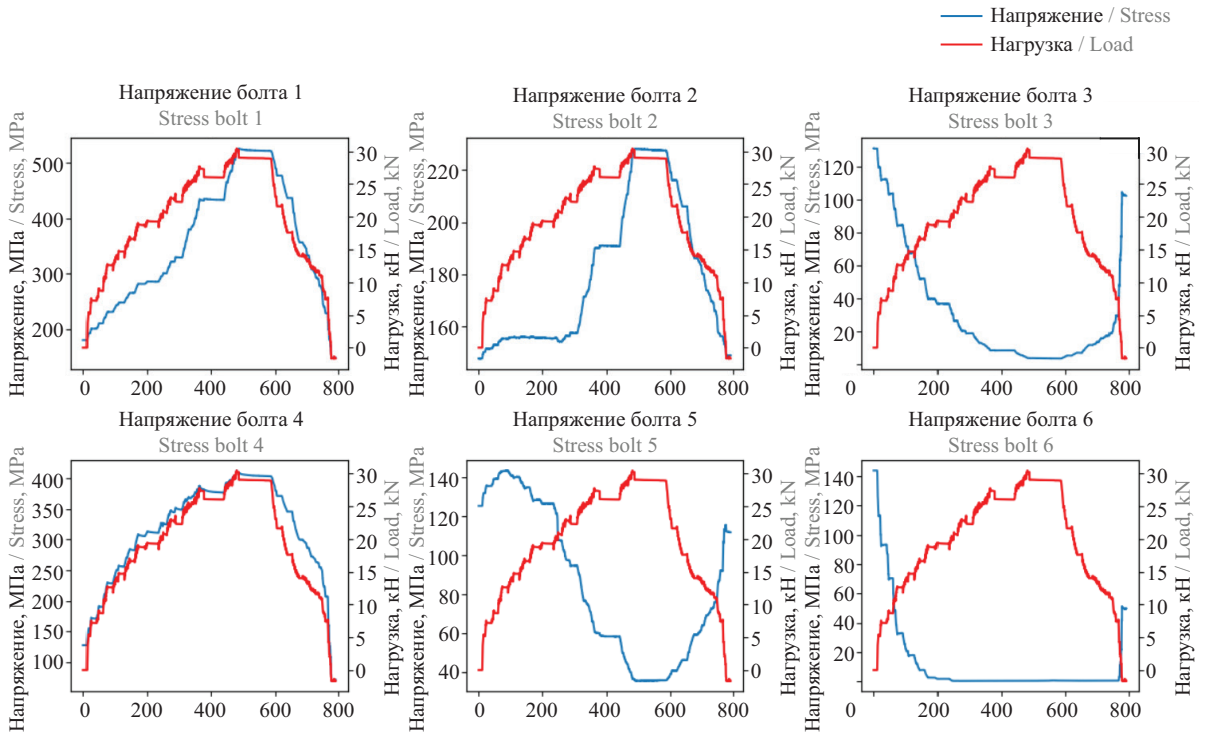


Рис. 17. Напряжения в болтах, третье испытание

Fig. 17. Bolt stresses, third test

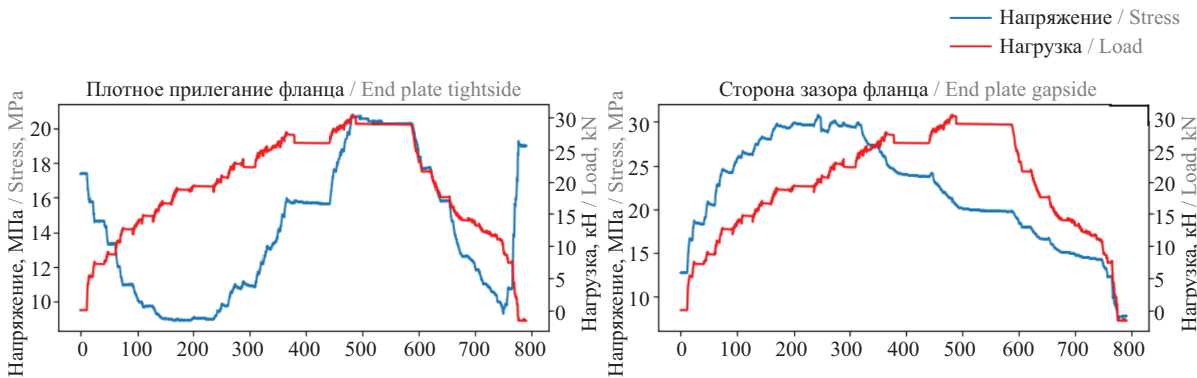


Рис. 18. Напряжения во фланце, третье испытание

Fig. 18. Flange stresses, third test

пытаниях. Особенностью напряжений со стороны максимального зазора является их уменьшение до начала снятия действующей на образец нагрузки. Со стороны плотного прилегания существенных отличий в характере работы не выявлено.

В табл. 9 представлены значения напряжений в болтах, которые конструктивно расположены в «растянутой» зоне фланцевого соединения. Напряжения в болтах первого испытания взяты при максимальной нагрузке этого испытания. Для второго и третьего испытаний напряжения в табл. 9 вычислены следующим образом. Полученные в результате испытаний напряжения корректировались умножением на поправочный коэффициент для второго испытания $35/40 = 0,875$, для третьего $35/30 = 1,167$. В указанных зависимостях 35, 40 и 30 кН соответственно максимальные нагрузки при первом, втором и третьем испытаниях. Это сделано для того, чтобы можно было оценить напряжения в болтах при одинаковых нагрузках. Кроме абсолютных значений, в табл. 9 представлены относительные величины напряжений по сравнению с первым испытанием и процент от суммы напряжений по всем болтам растянутой зоны.

Установлено выраженное смещение распределения напряжений в зону верхнего ряда болтов. Если для первого испытания разность между первым и вторым рядом составляет 6–17 %, то для вто-

рого и третьего испытаний эти значения составляют 20–46 % и 57–91 % соответственно. Для первого и второго испытаний характерно более равномерное распределение напряжений в растянутых болтах, чем при третьем испытании (параметр 3 табл. 9). Крайне неравномерное включение болтов в работу обусловлено наличием большого зазора, сильно влияющим на характер работы узла. При этом межгрупповая сумма напряжений в трех испытаниях различается не более чем на 10 %.

Экспериментально определено, что чем больше зазор, тем больше усилия в болтах. При этом максимальные значения возникают в болтах зоны плотного прижатия фланца к полке колонны. Такой характер распределения усилий является весьма опасным и может привести к разрушению сначала напряженных болтов зоны плотного прилегания, а затем после перераспределения усилий к разрушению болтов зоны зазора. В то же время при зазорах примыкания фланца к полке, соответствующих по величине зазорам 1–2 мм, обусловленным перекосом полок прокатных профилей или смещением колонн на монтаже, максимальные усилия в болтах (1-е и 2-е испытания) отличались мало. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность фланцевых соединений при зазорах больше нормативных, что является более благоприятными условиями для широкого применения фланцевых соединений.

Табл. 9. Напряжения в болтах «растянутой» зоны фланцевого соединения

Table 9. Stresses in the bolts of the “tensile” zone of the flange connection

Номер болта Bolt	Напряжения, МПа/% от суммы Stresses, MPa/% from the amount		
	1-е испытание First test	2-е испытание Second test	3-е испытание Third test
1	323/100/24	386/120/29	614/190/45
2	304/100/22	309/102/23	266/88/20
4	396/100/29	361/91/27	481/122/36
5	329/100/24	194/59/14	43/13/3
Суммарные напряжения Total stresses	1352/100/100	1250/—/92	1404/—/104

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ особенностей решаемых задач по учету влияния зазоров на работу фланцевых соединений, результаты численных расчетов фланцевых узлов и данных ранее проведенных исследований позволили разработать конструкцию экспериментальных образцов и установки для проведения многовариантных испытаний двух типов узлов при варьировании зазора между фланцем и полкой колонны. В ходе предварительных испытаний шпильки класса 8.8 определены механические характеристики стали шпильки. Подтверждена реализуемость установления напряжений в шпильке при помощи тензометрических датчиков, размещенных в прорезях, и достоверность получаемых данных.

На основании проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- разработана модель экспериментального образца, предложен способ формирования начальных зазоров и метод снятия показаний с болтов, позволяющий учитывать сложное НДС;
- предложена методика определения зазора в районе оси болта, обусловленного перекосом полок и прокатных двутавров, и возможными смещениями колонн относительно разбивочных осей с учетом вероятностной природы монтажных неточностей;
- образец шпильки с учетом ослабления сечения под размещение тензодатчиков соответствует нормируемым прочностным характеристикам, предъявляемым к болтам класса 8.8;

- выбранная форма пазов позволяет разместить тензодатчики и выводящие провода без выхода за габариты болта по внешней резьбе, что обеспечивает сохранность датчиков и проводов во время проведения эксперимента, подтверждена достоверность результатов, получаемых с размещенных в пазах болта тензодатчиков, и возможность применения такого приема при испытаниях болтовых соединений;

- подтверждены теоретические предпосылки о характере работы болтов в заданной конфигурации — верхние ряды работают с увеличением растягивающих усилий, в то время как в нижнем ряду напряжения падают;

- выявлен характер работы болтов и фланцевой пластины балки в узле при наличии зазоров различной величины;

- установлено, что увеличение зазора ведет к росту напряжений в наиболее нагруженных болтах и может привести к изменению характера работы соседних болтов;

- обнаружено, что со стороны более плотного примыкания до некоторых значений нагрузки болты сохраняют способность работать с учетом преднапряжения и продольные усилия в них не изменяются, при этом болты со стороны зазора сразу же включаются в работу на растяжение;

- подтверждена работоспособность фланцевых соединений с зазорами до 2 мм, величина которых обусловлена перекосами полок или смещением колонн на монтаже.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косенкова И.С., Егоров П.И. Сравнительный анализ узлов сопряжения стальной балки с колонной // Материалы 57-й студ. науч.-техн. конф. инженерно-строительного института ТОГУ. 2017. С. 150–154. EDN YTGEUL.

2. Добрачев В.М., Вершинин Д.С. Новое конструктивное решение жестких узлов стальных каркасов зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 7 (679). С. 5–17. EDN UKQJWH.

3. Вершинин Д.С., Шабанов Е.А., Добрачев В.М. Исследование напряженно-деформированного состояния жестких узлов стальных каркасов зданий с предварительным напряжением на компьютерных моделях // Инновации и инвестиции. 2020. № 10. С. 193–198. EDN XGFBME.

4. Володин М.В., Катюшин В.В., Конин Д.В., Олуромби А.Р., Рычков С.П., Нормирование требований к проектированию и приемке фланцевых соединений на основании экспериментальных данных и расчетов // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 1 (288). С. 62–73. EDN CBLPBA.

5. Сон М.П., Савич С.А., Землянухин А.Д., Шестаков А.П. Математическое моделирование фланцевых соединений в программном комплексе ANSYS // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 6–3 (60). С. 164–167. DOI: 10.23670/IRJ.2017.60.081. EDN YTTIZJ.

6. Сон М.П. Влияние механических характеристик болтов на НДС и работу фланцевых соединений балок с колоннами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 1 (33). С. 142–152. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.10. EDN VXKZFU.

7. Кашевара Г.Г., Сон М.П., Землянухин А.Д. Сравнение несущей способности и деформативности фланцевых узлов примыкания балки к колонне при разных толщинах фланца // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 1. С. 44–49. EDN JRUIXN.

8. Сон М.П. Экспериментальные исследования прочности фланцевых соединений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.

2018. Т. 14. № 4. С. 348–356. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-348-356. EDN UXZBEG.

9. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка – колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLJF.

10. Elflah M.A.H. Structural behaviour of stainless steel bolted beam to column joints : thesis. University of Birmingham, 2018. URL: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/8545/9/Elflah18PhD.pdf>

11. Tartaglia R., D’Aniello M., Costanzo S., Landolfo R., De Martino A. Seismic design and performance of extended stiffened end-plate joints // *ce/papers*. 2017. Vol. 1. Issue 2–3. Pp. 570–579. DOI: 10.1002/cepa.94

12. Cassiano D., D’Aniello M., Rebelo C. Seismic behaviour of gravity load designed flush end-plate joints // *Steel and Composite Structures*. 2018. Vol. 26. Issue 5. DOI: 10.12989/scs.2018.26.5.621

13. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Irawan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 930. Issue 1. P. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050

14. Hasan M.J., Ashraf M., Uy B. Moment-rotation behaviour of top-seat angle bolted connections produced from austenitic stainless steel // *Journal of Constructional*

Steel Research. 2017. Vol. 136. Pp. 149–161. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.05.014

15. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5133. DOI: 10.3390/ma13225133

16. Pisarek Z. Calculation of the bolted end-plate joints subjected to two axis bending // *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2013. Vol. 30. Issue 60. Pp. 219–229. DOI: 10.7862/rb.2013.27

17. Costa R., Valdez J., Oliveira S., da Silva L.S., Bayo E. Experimental behaviour of 3D end-plate beam-to-column bolted steel joints // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 188. Pp. 277–289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.017

18. Al-Rifaie A. Lateral impact responses of steel end plate beam-to-column connections : thesis. University of Liverpool, 2018. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/160276083.pdf>

19. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 14. P. 4812. DOI: 10.3390/app10144812

20. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5133. DOI: 10.3390/ma13225133

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 12 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Туснин — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор института Промышленного и гражданского строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru;

Валерия Дмитриевна Платонова — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; platonovaleria@yandex.ru.

Вклад авторов:

Туснин А.Р. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста.

Платонова В.Д. — сбор и обработка материала, написание статьи, развитие методологии.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kosenkova I.S., Egorov P.I. Comparative analysis of the coupling nodes of a steel beam with a column. *Materials of the 57th student scientific and technical conference of the Engineering and Construction Institute of TOGU*. 2017; 150-154. EDN YTGEUL. (rus.).

2. Dobrachev V.M., Vershinin D.S. New frame-parts engineering solutions for the steel frame of the building. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2015; 7(679):5-17. EDN UKQJWH. (rus.).

3. Vershinin D.S., Shabanov E.A., Dobrachev V.M. Research of stress-deformed state of rigid units of steel frames of buildings with preliminary voltage on computer models. *Innovations and Investments*. 2020; 10:193-198. EDN XGFBME. (rus.).
4. Volodin M.V., Katushin V.V., Konin D.V., Olurombi A.R., Rychkov S.P. Standardization of requirements for the design and acceptance of flange connections on the basis of experimental data and calculations. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2020; 1(288):62-73. EDN CBLPBA. (rus.).
5. Son M.P., Savich S.A., Zemlyanukhin A.D., Shestakov A.P. Mathematical modeling of flange connections in ANSYS software complex. *International Research Journal*. 2017; 6-3(60):164-167. DOI: 10.23670/IRJ.2017.60.081. EDN YTTIZJ. (rus.).
6. Son M. Influence of mechanical characteristics of bolts on stress-strain state and behavior of flange connections of beams with columns. *PNRPU Bulletin. Urban development*. 2019; 1(33):142-152. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.10. EDN VXKZFU. (rus.).
7. Kashevarova G.G., Son M.P., Zemlyanukhin A.D. Comparison of the bearing capacity and deformability of the flange units of the beam-to-column junction at different flange thicknesses. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2020; 1:44-49. EDN JRUIXN. (rus.).
8. Son M.P. Experimental studies of strength flanged connections. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018; 14(4):348-356. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-348-356. EDN UXZBEG. (rus.).
9. Tusnina V.M., Platonova V.D. Numerical analysis of the stiffness of the “beam-column” flange joints. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLJF. (rus.).
10. Elflah M.A.H. *Structural behaviour of stainless steel bolted beam to column joints : thesis*. University of Birmingham, 2018. URL: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/8545/9/Elflah18PhD.pdf>
11. Tartaglia R., D’Aniello M., Costanzo S., Landolfo R., De Martino A. Seismic design and performance of extended stiffened end-plate joints. *ce/papers*. 2017; 1(2-3):570-579. DOI: 10.1002/cepa.94
12. Cassiano D., D’Aniello M., Rebelo C., Seismic behaviour of gravity load designed flush end-plate joints. *Steel and Composite Structures*. 2018; 26(5). DOI: 10.12989/scs.2018.26.5.621
13. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Irawan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 930(1):012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050
14. Hasan M.J., Ashraf M., Uy B. Moment-rotation behaviour of top-seat angle bolted connections produced from austenitic stainless steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 136:149-161. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.05.014
15. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection. *Materials*. 2020; 13(22):5133. DOI: 10.3390/ma13225133
16. Pisarek Z. Calculation of the bolted end-plate joints subjected to two axis bending. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2013; 30(60):219-229. DOI: 10.7862/rb.2013.27
17. Costa R., Valdez J., Oliveira S., da Silva L.S., Bayo E. Experimental behaviour of 3D end-plate beam-to-column bolted steel joints. *Engineering Structures*. 2019; 188:277-289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.017
18. Al-Rifaie A. *Lateral Impact Responses of Steel End Plate Beam-to-Column Connections: thesis*. University of Liverpool, 2018. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/160276083.pdf>
19. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression. *Applied Sciences*. 2020; 10(14):4812. DOI: 10.3390/app10144812
20. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection. *Materials*. 2020; 13(22):5133. DOI: 10.3390/ma13225133

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on September 9, 2023.

Approved for publication on September 12, 2023.

B I O N O T E S: **Alexander R. Tusnin** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metal and Wooden Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru;

Valeria D. Platonova — postgraduate student of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; platonovaleria@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Alexander R. Tusnin — supervision, conceptualization, methodology, scientific editing of the text.

Valeria D. Platonova — data gathering and processing, writing of the article, methodology.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Влияние усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок

Григорий Иванович Белый, Антон Евгеньевич Кубасевич

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

АННОТАЦИЯ

Введение. На промышленных производствах с мостовыми кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы подкрановые балки эксплуатируются с повреждениями, значительную часть которых составляют усталостные трещины в стенке. При этом во многих случаях поврежденные подкрановые балки имеют запасы несущей способности, которые при начальной стадии развития трещин позволяют временно их эксплуатировать до ремонта или замены. Оценка влияния таких повреждений на прочность подкрановых балок в этих условиях становится актуальной.

Материалы и методы. Для исследования напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке применен метод численного моделирования с использованием конечно-элементного программного комплекса ANSYS. Анализ напряженно-деформированных состояний балок проведен в сечениях, соответствующих середине трещины, и в смежных с поврежденным отсеках.

Результаты. Выявлены качественные и количественные зависимости изменения напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок от длины трещины, ее положения в отсеке при раздельном действии изгибающего момента и поперечной силы, а также при их совместном действии. Показано, что такое ослабление стенки приводит к существенной перегрузке сжатого пояса. Даны рекомендации по торможению развития трещин, позволяющие повысить эксплуатационную пригодность конструкции.

Выводы. Предложены рекомендации по практическому расчету подкрановых балок на прочность с введением коэффициентов влияния трещины и алгоритм определения предельной длины трещины. Отмечена важность дальнейшего исследования влияния дефектов крепления рельса к поясу на несущую способность поврежденной балки. При этом необходима статистическая обработка величин отклонений геометрических несовершенств, приобретенных в процессе эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подкрановая балка, усталостная трещина, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, геометрические несовершенства, устойчивость стенки, прочность поврежденной балки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белый Г.И., Кубасевич А.Е. Влияние усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1780–1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790

Автор, ответственный за переписку: Антон Евгеньевич Кубасевич, antunemio@yandex.ru.

Effect of fatigue cracks in the wall on the strength of crane beams

Grigory I. Belyy, Anton E. Kubasevich

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

ABSTRACT

Introduction. In industrial plants with overhead cranes of heavy and very heavy modes of operation, crane beams are operated with damage, a significant part of which are fatigue cracks in the wall. At the same time, in many cases, damaged crane beams have reserves of bearing capacity, which, at the initial stage of crack development, allow their temporary operation until repair or replacement. Assessment of the effect of fatigue cracks on the strength of crane beams under these conditions becomes actual.

Materials and methods. To study the stress-strain and limit states of crane beams with fatigue cracks in the wall, the method of numerical modelling using the finite element software complex ANSYS is used. The analysis of the stress-strain states of the beams was carried out in the sections corresponding to the crack centre and in the adjacent to the damaged compartments.

Results. Qualitative and quantitative dependences of changes in the stress-strain and limit states of crane beams on the crack length, its position in the compartment under separate action of bending moment and transverse force, as well as their joint action are revealed. It is shown that the weakening of the wall by a fatigue crack leads to significant overload of the compressed girdle. Recommendations on inhibition of crack development, allowing to increase serviceability of the structure.

Conclusions. Recommendations on practical calculation of crane beams for strength with the introduction of crack influence coefficients and an algorithm for determining the maximum crack length are proposed. The importance of further investigation of the effect of defects of rail to girder fastening on the bearing capacity of the damaged beam is noted. At the same time, statistical processing of deviation values of geometric imperfections acquired in the course of operation is necessary.

KEYWORDS: crane beam, fatigue crack, numerical modelling, stress-strain state, geometric imperfections, wall stability, strength of the damaged beam

FOR CITATION: Belyy G.I., Kubasevich A.E. Effect of fatigue cracks in the wall on the strength of crane beams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1780-1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790 (rus.).

Corresponding author: Anton E. Kubasevich, antunemio@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ обследований производственных зданий с мостовыми кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы показывает, что подкрановые балки эксплуатируются с повреждениями, значительную часть которых (90–95 % от общего количества) составляют усталостные трещины в стенке [1–3]. При этом следует заметить, что первые повреждения могут появиться в течение 2–5 лет после ввода конструкций в эксплуатацию.

Трещины в стенке у сжатого пояса могут возникнуть по ряду причин [4–6]:

- микродефекты в сварных швах;
- концентраторы напряжений в местах крепления конструктивных элементов;
- несовершенства геометрии элементов балок;
- значительные эксцентриситеты рельса, приводящие к увеличению крутящих моментов (рис. 1);
- перекосы кранов;
- повреждения креплений рельсов к подкрановым балкам и др.

Анализ исследований, посвященных таким конструкциям, позволяет выделить следующие группы подходов к оценке их эксплуатационной пригодности:

- вероятностный подход [7];
- определение остаточного ресурса подкрановой балки с использованием критериев механики разрушения [8];
- оценка эксплуатационной пригодности подкрановых балок с усталостными трещинами на основе их фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) [9].

Значительная часть исследований относится ко второй группе, из которых необходимо отметить: экспериментальное изучение циклической трещиностойкости [10–12], исследование усталостной долговечности [13, 14] и прочности подкрановых балок [15, 16].

Как указано в работах [7, 17, 18], во многих случаях поврежденные подкрановые балки имеют запасы несущей способности, которые при начальной стадии развития трещин дают возможность их временно эксплуатировать до ремонта или замены. Однако имеющиеся в литературе результаты исследования не позволяют достоверно принимать такие решения при выявленных длинах трещин. Таким образом, исследование влияния усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок является актуальным.

В настоящей работе предложена методика расчета поврежденных балок на прочность; получены зависимости снижения несущей способности балок от длины трещины и ее положения в отсеке при чистом изгибе и сдвиге; представлены рекомендации по временной эксплуатации поврежденной конструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования представляет собой подкрановую балку симметричного двутаврового сечения, эксплуатируемую на производстве с кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы, имеющую горизонтальные усталостные трещины в стенке у сжатого пояса.

По мере роста трещины в поврежденной части балки существенно изменяется характер НДС, который сопровождается изменением формы деформирования запредельно работающей стенки. Большое влияние оказывают и геометрические несовершенства стенки и сжатого пояса [19, 20]. Учитывая изложенное, исследование НДС таких конструкций проводилось методом численного моделирования с помощью конечно-элементного программного комплекса ANSYS.

Сварные подкрановые балки, как известно, относятся к 1-й группе стальных конструкций, расчет которых выполняется в упругой стадии работы материала. Подбор параметров сечений балок для выполнения численных исследований осуществлялся на основе анализа характеристик эксплуатируемых балок, при этом гибкости стенок были приняты трех типов $\lambda_w = \{100; 120; 140\}$, условные значения которых охватывают широкий спектр запроектированных балок. Принятые геометрические габариты

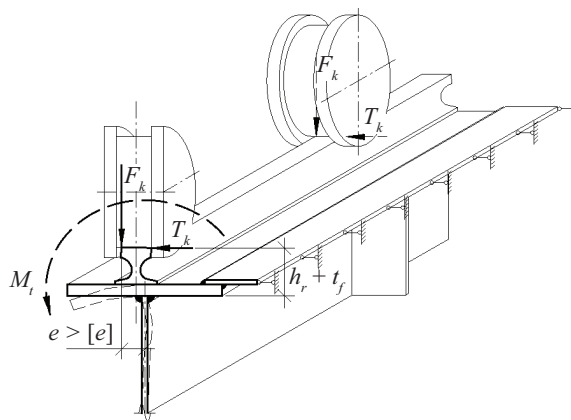


Рис. 1. Действительная схема локальных нагрузок на подкрановую балку

Fig. 1. Actual scheme of local loads on the crane beam

Табл. 1. Геометрические характеристики исследуемых подкрановых балок

Table 1. Geometric characteristics of the crane beams under study

Марка балки Beam grade	Размеры сечения, мм Cross-section dimensions, mm		$\lambda_w = h_w / t_w$	$\bar{\lambda}_w = \lambda_w \sqrt{R_y / E},$ $R_y = 350 \text{ МПа} / \text{МПа}$
	поясы girdles	стенки walls		
ПБ1 СВ1	−280 × 14	−900 × 9	100	4,12
ПБ2 СВ1	−300 × 14	−1080 × 9	120	4,95
ПБ3 СВ1	−320 × 14	−1260 × 9	140	5,77

сечений имеют характеристики, близкие к типовым подкрановым балкам, которые приведены в табл. 1. Поперечные ребра жесткости установлены с шагом 1,5 м. Трещина моделировалась как «разрыв» между стенкой и сжатым поясом, позволяющий свободно перемещаться верхней грани стенки относительно сжатого пояса.

Трещины в стенке по их геометрическому расположению в отсеке можно разделить на несколько типов: внутри отсека балок, вблизи ребер жесткости, а также проходящие через них в нескольких отсеках (см. рис. 2). В настоящей работе рассматривались наиболее часто встречающиеся положения трещин: посередине отсека и у ребра жесткости.

С целью получения действительной картины НДС в рассматриваемой зоне нагрузка прикладывалась по краям фрагмента балки, состоящего из трех отсеков, средний из которых имел усталостную трещину. Общий вид расчетной модели, нагруженной распределенной по торцам нагрузкой по формам напряжений от действия изгибающего момента и поперечной силы, приведен на рис. 3.

Вид конечно-элементной расчетной модели фрагмента балки с трещиной показан на рис. 4. Для

более точного определения напряжений при расчете конструкций методом конечных элементов использовались восьмиузловые оболочечные конечные элементы (КЭ) типа SHELL281.

Алгоритм решения поставленной задачи разделяется на два этапа:

- определение форм начальных геометрических несовершенств поврежденной подкрановой балки (стенки и сжатой полки);
- решение деформационной задачи поврежденного фрагмента балки (с учетом геометрической нелинейности).

Изменение НДС поврежденных подкрановых балок устанавливалось в сечениях, соответствующих середине трещины, и в смежных с поврежденным отсеком. Выявленные в процессе обследования трещины имеют фиксированную длину, поэтому вопрос механизма их образования и кинетики развития в настоящей работе не рассматривался.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По разработанному алгоритму определялось снижение несущей способности поврежденных подкрановых балок с учетом геометрических несо-

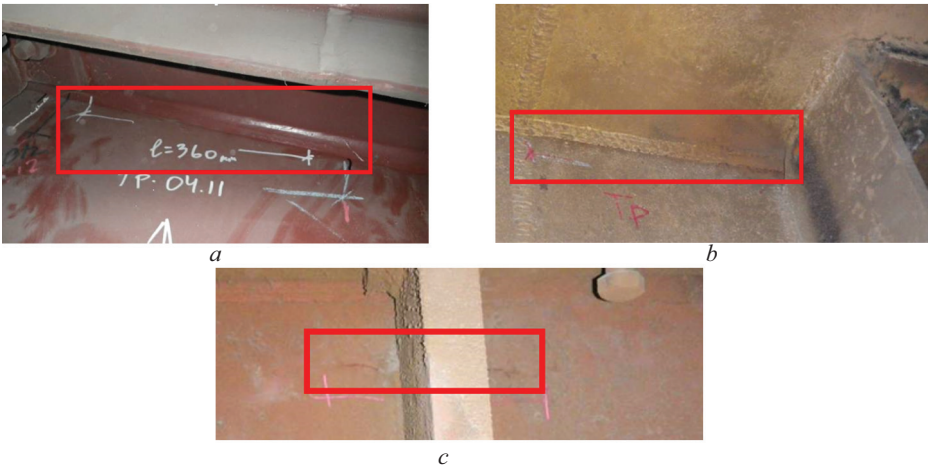


Рис. 2. Фотофиксация дефектов подкрановых балок в виде усталостных трещин: а — посередине отсека; б — по поясному шву у ребра жесткости; с — проходящей через ребро жесткости в двух соседних отсеках

Fig. 2. Photofixation of crane beam defects in the form of fatigue cracks: a — in the middle of the compartment; b — along the belt seam at the stiffening rib; c — passing through the stiffening rib in two adjacent compartments

вершенств при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы.

Прочность подкрановой балки с усталостной трещиной в стенке при действии изгибающего момента

В работах [9, 21] было показано, что при появлении усталостной трещины ослабление стенки приводит к существенной перегрузке сжатого пояса, усилие в котором возрастает до 15 %. При этом в растянутом — до 5 %, а момент, воспринимаемый стенкой, уменьшается до 20 %. Следовательно, общая несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами при воздействии изгибающего момента в большей степени определяется несущей способностью сжатого пояса. На рис. 5, а–с показаны соответственно схема поврежденного отсека, сечение с трещиной и характерная эпюра действующих нормальных напряжений.

Исследование проводилось с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса, начальные значения которых принимались по техническим условиям на стальные конструкции¹.

¹ ГОСТ 23118–2019. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2020. 40 с.

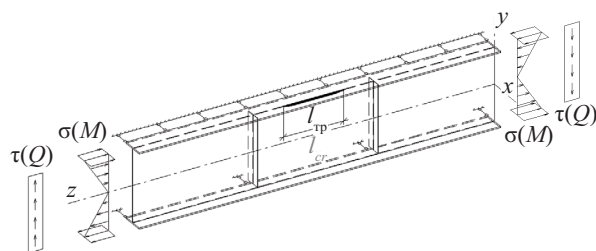


Рис. 3. Общий вид расчетной модели подкрановой балки с граничными условиями и нагрузкой

Fig. 3. General view of the crane beam design model with boundary conditions and loading

При этом следует заметить, что во многих случаях фактические значения отклонений поврежденных конструкций значительно превышают допустимые в ГОСТ [17], что необходимо учитывать при проверке прочности балок.

На первом этапе оценивалось влияние трещин на увеличение напряжений в сжатом поясе при действии изгибающего момента с учетом несовершенств. В табл. 2 показано возрастание относительных нормальных напряжений в сжатом поясе $\bar{\sigma}_{f,тр} = \sigma_{f,тр} / \sigma_f$ (σ_f — напряжение в поясе балки

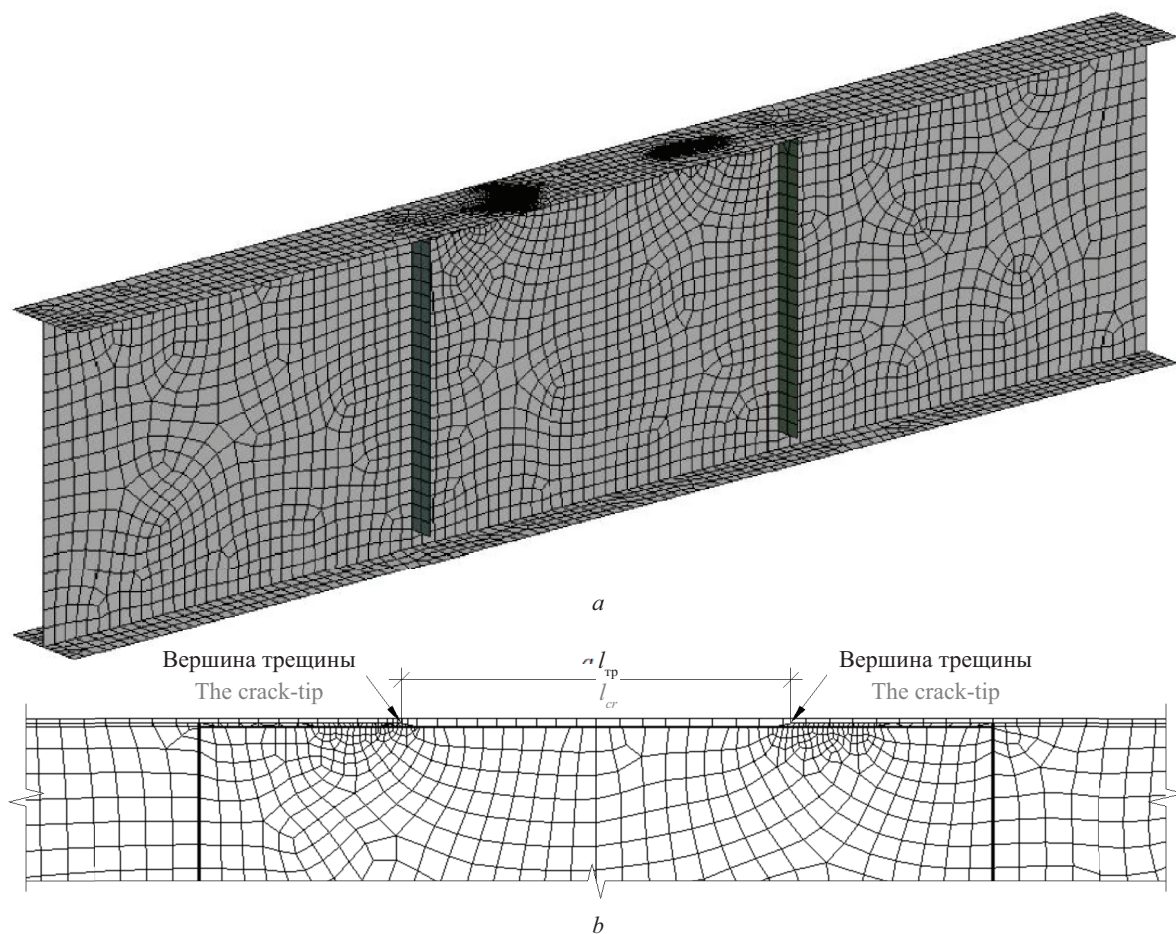


Рис. 4. Конечно-элементная модель балки: а — общий вид; б — фрагмент КЭ модели с утончением сетки в зоне трещины
Fig. 4. Finite element model of the beam: а — general view; б — fragment of the FE model with increasing mesh in the crack zone

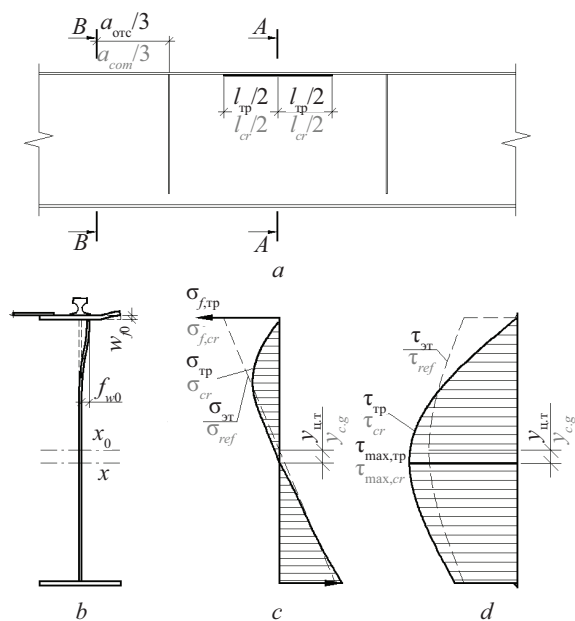


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние балки при изгибе: а — схема поврежденного отсека; б — сечение с трещиной; в — эпюра нормальных напряжений; д — эпюра касательных напряжений

Fig. 5. Stress-strain state of the beam during bending: а — diagram of the damaged compartment; б — section with a crack; в — epure of normal stresses; д — epure of tangential stresses

без трещины) в зависимости от условной гибкости стенки и длины трещины. При положении трещины посередине отсека $\bar{\sigma}_{f,тр}$ приведены в числителе, а у ребра жесткости — в знаменателе.

Прочность при действии поперечной силы

Влияние трещины на изменение напряженно-деформированных состояний, вызванных поперечной силой, определялось с учетом несовершенств в виде местных выпучиваний по форме потери устойчивости стенки с трещиной. Эпюра касатель-

ных напряжений в сечении А–А, соответствующем середине трещины, показана на рис. 5, д.

Результаты исследований сведены в табл. 3, в которой $\bar{\tau}_{max,тр} = \tau_{max,тр} / \tau_{max}$ (τ_{max} — максимальные касательные напряжения неповрежденной стенки).

Как видно из табл. 2, 3, по мере роста трещины в сечении А–А существенно возрастают нормальные напряжения в сжатых поясах и максимальные касательные в стенках, которые достигают 26,2 и 20,7 % соответственно. При этом с увеличением гибкости стенки нормальные напряжения в поясе возрастают, а касательные в стенке — уменьшаются.

Прочность при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

Исследование проводилось выборочно для подкрановых балок со средним значением условной гибкости ($\bar{\lambda}_w = 4,95$) при различных соотношениях момента и поперечной силы. Было выявлено, что зависимости увеличения напряжений $\bar{\sigma}_{f,тр}$ и $\bar{\tau}_{max,тр}$ — линейные, увеличение нормальных напряжений в сжатом поясе до +4,4 %, максимальных касательных в стенке до +3,0 %, что учитывается при разработке практических рекомендаций.

Практические рекомендации по расчету подкрановых балок с усталостными трещинами

С целью удобства практического расчета полученные результаты увеличения относительных нормальных в сжатом поясе $\bar{\sigma}_{f,тр}$ и касательных в стенке $\bar{\tau}_{max,тр}$ напряжений с учетом взаимного влияния изгибающего момента и поперечной силы приведены в табл. 4, 5 к обратным их значениям в виде коэффициентов $c_{f,тр}$, $c_{w,тр}$.

Тогда проверку прочности можно выполнить по рекомендациям СП 16.13330² с введением новых

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. М. : ФГУП ЦПП, 2017. 147 с.

Табл. 2. Относительные нормальные напряжения в сжатом поясе при наличии трещины с учетом геометрических несовершенств поврежденной балки

Table 2. Relative normal stresses in the compressed girder in the presence of a crack, taking into account geometric imperfections of the damaged beam

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{кр} = l_{кр} / a_{ком}$	Значения $\bar{\sigma}_{f,тр}$ в сечениях А–А и В–В при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной Values $\bar{\sigma}_{f,тр}$ in sections А–А and В–В with $\bar{\lambda}_{w,тр}$, equal					
	4,12		4,95		5,77	
	А–А	В–В	А–А	В–В	А–А	В–В
0,25	<u>1,088</u> 1,080	<u>1,000</u> 0,999	<u>1,104</u> 1,084	<u>0,998</u> 0,989	<u>1,130</u> 1,088	<u>0,997</u> 0,998
0,50	<u>1,108</u> 1,096	<u>0,997</u> 0,999	<u>1,129</u> 1,110	<u>0,995</u> 0,998	<u>1,153</u> 1,126	<u>0,994</u> 0,999
0,75	<u>1,163</u> 1,151	<u>0,992</u> 0,998	<u>1,194</u> 1,175	<u>0,990</u> 0,995	<u>1,219</u> 1,199	<u>0,989</u> 0,997
1,00	1,206	0,994	1,238	0,990	1,262	0,991

Табл. 3. Относительные касательные напряжения стенки с трещиной с учетом геометрических несовершенств поврежденной балки

Table 3. Relative tangential stresses of the cracked wall taking into account geometric imperfections of the damaged beam

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{cr} = l_{cr} / a_{com}$	Значения $\bar{\tau}_{max,тр}$ в сечениях $A-A$ и $B-B$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной Values $\bar{\tau}_{max,cr}$ in sections $A-A$ and $B-B$ with $\bar{\lambda}_{w,cr}$, equal					
	4,12		4,95		5,77	
	$A-A$	$B-B$	$A-A$	$B-B$	$A-A$	$B-B$
0,25	<u>1,063</u> 1,106	<u>1,000</u> 1,023	<u>1,063</u> 1,138	<u>1,004</u> 1,004	<u>1,053</u> 1,162	<u>1,047</u> 1,002
0,50	<u>1,101</u> 1,110	<u>1,000</u> 1,026	<u>1,082</u> 1,139	<u>0,998</u> 1,009	<u>1,075</u> 1,170	<u>0,997</u> 0,991
0,75	<u>1,165</u> 1,149	<u>1,004</u> 1,034	<u>1,140</u> 1,160	<u>1,007</u> 1,018	<u>1,126</u> 1,171	<u>0,982</u> 0,983
1,00	1,207	1,043	1,190	1,038	1,179	0,992

данных о влиянии трещины:

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x \leq 1;$$

(1)

$$\frac{QS}{c_{w,тр} I_x t_w R_s \gamma_c} \leq 1.$$

(2)

Зная фактические параметры поврежденных подкрановых балок и места возникновения трещин, с по-

мощью разработанной инженерной методики оценки прочности можно определить предельную длину трещины $[\bar{l}_{тр}]$ по алгоритму, показанному на рис. 6.

Методы повышения эксплуатационной пригодности подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке

Способом повышения эксплуатационной пригодности поврежденных подкрановых балок является локализация имеющихся трещин и снижение

Табл. 4. Значения понижающих коэффициентов влияния трещины $c_{f,тр}$

Table 4. Values of the reducing coefficients of the crack effect $c_{f,cr}$

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{cr} = l_{cr} / a_{com}$	Значения $c_{f,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной $c_{f,cr}$ values when $\bar{\lambda}_{w,cr}$ is equal to		
	4,12	4,95	5,77
0,00	1,000	1,000	1,000
0,25	<u>0,880</u> 0,887	<u>0,868</u> 0,883	<u>0,847</u> 0,880
0,50	<u>0,865</u> 0,874	<u>0,848</u> 0,863	<u>0,831</u> 0,851
0,75	<u>0,823</u> 0,832	<u>0,802</u> 0,815	<u>0,786</u> 0,799
1,00	0,794	0,774	0,759

Табл. 5. Значения понижающих коэффициентов влияния трещины $c_{w,тр}$

Table 5. Values of the reducing coefficients of the crack effect $c_{w,cr}$

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$ $\bar{l}_{cr} = l_{cr} / a_{com}$	Значения $c_{w,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной $c_{w,cr}$ values when $\bar{\lambda}_{w,cr}$ is equal to		
	4,12	4,95	5,77
0,00	1,000	1,000	1,000
0,25	<u>0,913</u> 0,878	<u>0,913</u> 0,853	<u>0,922</u> 0,836
0,50	<u>0,882</u> 0,875	<u>0,897</u> 0,852	<u>0,903</u> 0,830
0,75	<u>0,833</u> 0,845	<u>0,852</u> 0,837	<u>0,863</u> 0,829
1,00	0,804	0,816	0,823

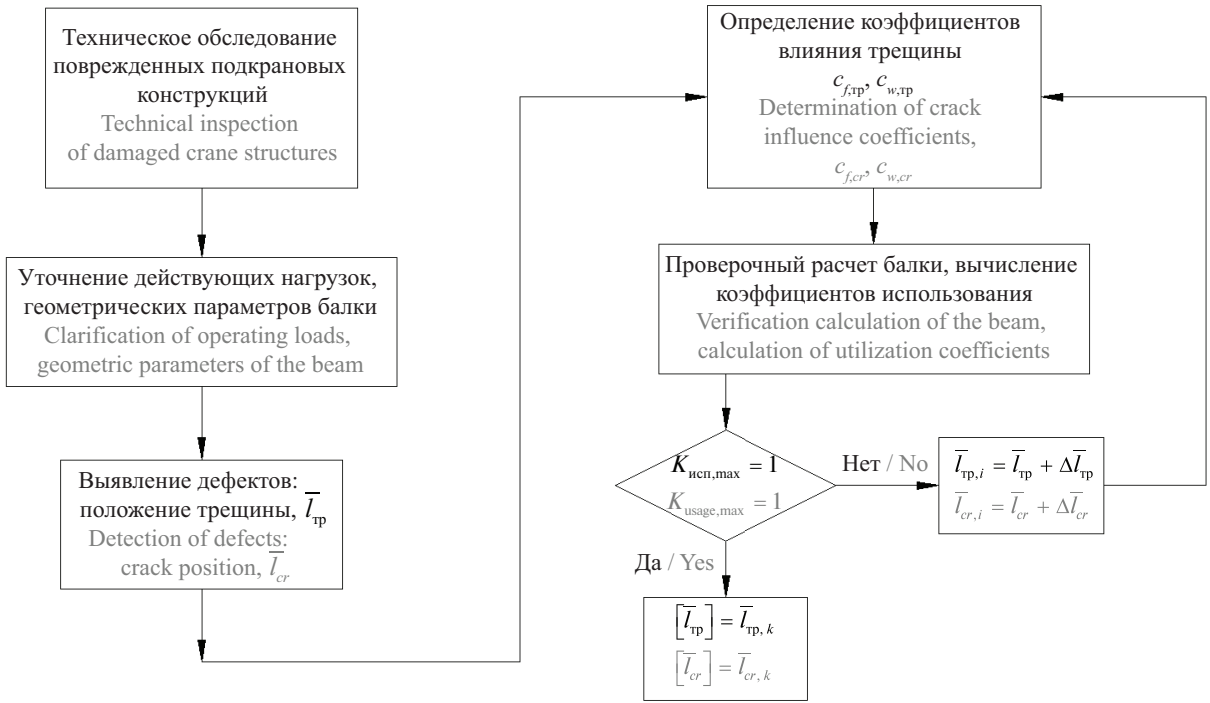


Рис. 6. Алгоритм определения предельной длины трещины
Fig. 6. Algorithm for determining the ultimate crack length

скорости их развития, для замедления которой можно выделить следующие методы³ [9]:

1. Эксплуатационно-технический. Метод заключается в систематическом снижении нагрузок на подкрановые балки. Некоторые из принимаемых мероприятий: ограничение грузоподъемности кранов, изменение технологической схемы работы тележки и кранов в пролете и др.

³ СТО 22-15-06. Временные методические указания по техническому надзору за эксплуатацией подкрановых балок с усталостными трещинами в верхней зоне стенки. Новосибирск : НГАСУ Сибстрин, 2007. 81 с.

2. Технологический, в рамках которого осуществляется обработка зоны трещины с целью устранения самой трещины и/или уменьшения концентрации напряжений в области ее вершин. При этом необходимо избегать простую заварку трещин. Варианты технологических мероприятий могут также включать: поверхностный наклеп стенки балки вблизи трещины (рис. 7, а), рассверловку вершин трещин с последующей постановкой высокопрочных болтов (рис. 7, б) и др.

3. Конструктивный метод предполагает устройство новых элементов в подкрановые балки с целью снижения напряжений в месте трещины. Примеры

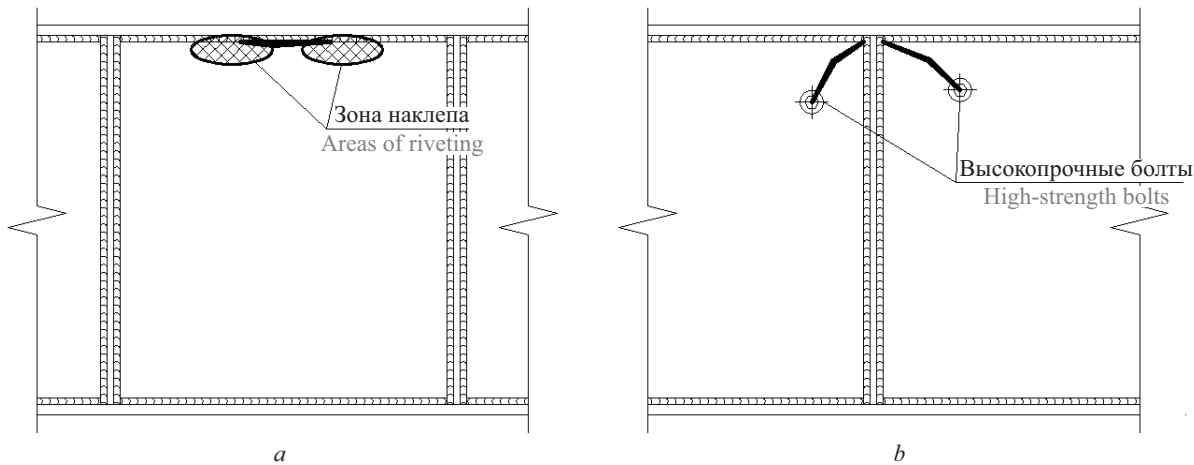


Рис. 7. Технологическое торможение развития усталостных трещин в стенке: а — методом наклепа сварного шва; б — засверловкой трещины с постановкой высокопрочного болта

Fig. 7. Technological inhibition of fatigue cracks development in the wall: а — by weld riveting method; б — by drilling out the crack with high-strength bolt placement

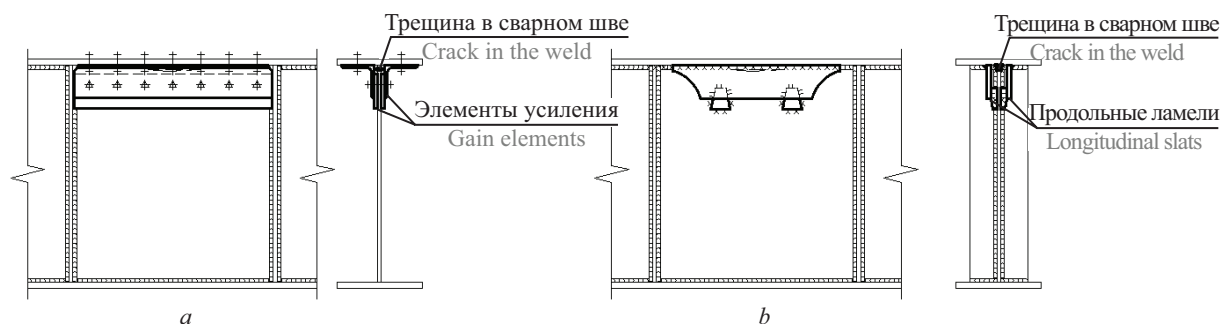


Рис. 8. Конструктивное торможение развития усталостных трещин в стенке с установкой: *a* — усиливающих уголкового элемента с креплением высокопрочными болтами; *b* — продольных ламелей и элементов, связывающих ламели со стенкой

Fig. 8. Constructive inhibition of the development of fatigue cracks in the wall with the installation: *a* — reinforcing corner elements with fastening with high-strength bolts; *b* — longitudinal lamellae and elements connecting the lamellae to the wall

конструктивных мероприятий: устройство уголкового усиливающего элемента с креплением их высокопрочными болтами или на сварке к поясу и стенке (рис. 8), увеличение сечений элементов [22], введение дополнительных промежуточных опор [23] и др.

4. Комбинированный заключается в совместном использовании упомянутых ранее методов, что обеспечивает наиболее эффективный результат. При обосновании возможности временной эксплуатации поврежденных подкрановых балок желательно применять указанный метод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлены качественные и количественные зависимости снижения несущей способности поврежденных балок в зависимости от гибкости стенки, длины усталостной трещины и ее положения при совместном действии изгибающего момента и попе-

речной силы, и показано, что ослабление приводит к весьма существенной перегрузке сжатого пояса. Нормальные напряжения в сжатых поясах увеличиваются до 26,2 %, а максимальные касательные в стенках до 20,7 %. Полученные результаты дали возможность разработать рекомендации по расчету поврежденных подкрановых балок на прочность. Даны рекомендации по торможению развития трещин, позволяющие повысить эксплуатационную пригодность конструкции.

Перспективой дальнейшей разработки темы может являться исследование влияния дефектов крепления рельса к сжатому поясу на несущую способность поврежденной балки со статистической обработкой величин отклонений при эксплуатации. Данное направление актуально, поскольку указанные величины прямым образом влияют на снижение несущей способности поврежденной подкрановой балки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Артюхов В.Н., Щербаков Е.А., Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р. О состоянии подкрановых конструкций корпуса конверторного производства ОАО «Северсталь» // Промышленное и гражданское строительство. 2001. № 6. С. 31–34.
2. Бабкин В.И., Жидков К.Е., Капырин Н.В., Мерзликин А.В. К вопросу долговечности сварных подкрановых балок // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2016. № 1 (27). С. 46–49. EDN VSSNKT.
3. Еремин К.И., Нащекин М.В., Марков К.В., Горбунов А.Г. Повреждаемость подкрановых балок предприятий металлургической и горнорудной промышленности // Наука и безопасность. 2015. № 3 (16). С. 59–77. EDN TYNUTT.
4. Складнев А.И., Сердюк В.В. Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенки сварных подкрановых балок // Безопасность

- труда в промышленности. 2004. № 11. С. 34–36. EDN JVVWQP.
5. Такки В.Ф., Егоров И.Ф., Туснина О.А. Повышение эксплуатационного ресурса подкрановых балок // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 61–67. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67. EDN UIUJGJ.
6. Фын Сю-Цзюнь, Линь Синь-Шань, Фан Тиан. Исследование усталостных повреждений верхней зоны стенок стальных подкрановых балок // Промышленное и гражданское строительство. 1994. № 11–12. С. 33–35.
7. Васюта Б.Н., Крылов И.И., Кукушко С.С. К вопросу определения параметров остаточного ресурса сварных подкрановых балок с усталостными повреждениями // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. № 6 (570). С. 114–120. EDN GZQGFV.

8. Москвичев В.В., Чабан Е.А. Анализ развития усталостных трещин в подкрановых балках // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 7. С. 47–54. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-47-54

9. Кубасевич А.Е. Напряженно-деформированные и предельные состояния подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023. 165 с.

10. Dong S.E., Chen Q. Probe on the stress of the support crack of welded crane beams // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 501–504. Pp. 710–716. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.710

11. Rettenmeier P., Roos E., Weihe S. Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 82. Pp. 179–187. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.04.009

12. Wardenier J., de Vries P., Timmerman G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 140. Pp. 163–173. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.10.027

13. Ávila G., Palma E., De Paula R. Crane girder fatigue life determination using SN and LEFM methods // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 79. Pp. 812–819. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.027

14. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowicki S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders — locations, causes and calculations // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. Issue 1. Pp. 69–82. DOI: 10.1016/j.acme.2017.05.003

15. Xu B., Wu Q. Stress fatigue crack propagation analysis of crane structure based on acoustic emission // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 109. P. 104206. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104206

16. Zai J., Cao J., Bell A.J. The fatigue strength of box girders in overhead travelling cranes // Journal of the Institution of Structural Engineers. 1994. Vol. 72. Issue 23. Pp. 401–405.

17. Веселов В.В. Оценка работоспособности эксплуатируемых стальных подкрановых балок : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 267 с.

18. Маркеев В.С., Борков П.В. Прогнозирование остаточного ресурса металлических подкрановых балок промышленных зданий длительного срока эксплуатации // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 10. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-8-16. EDN KBOFRU.

19. Graciano C., Casanova E., Martínez J. Imperfection sensitivity of plate girder webs subjected to patch loading // Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 7. Pp. 1128–1133. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.02.006

20. Kulka J., Mantic M., Fedorko G., Molnar V. Analysis of crane track degradation due to operation // Engineering Failure Analysis. 2016. Vol. 59. Pp. 384–395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.009

21. Белый Г.И., Кубасевич А.Е. Несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 24–29. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-24-29. EDN WCKLTW.

22. Рафиев А.К., Марамоу Ф.Б. Усиление подкрановых балок методом увеличения сечений // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 1 (49). С. 143–150. EDN CXCLUX.

23. Рафиев А.К., Ашууров И.Ш. Усиление подкрановых балок методом изменения конструктивной схемы // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 3 (51). С. 99–107. EDN IBHRWU.

Поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 17 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Григорий Иванович Белый — доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 272945; office@erkon.ru;

Антон Евгеньевич Кубасевич — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1060856, ORCID: 0000-0002-5186-8518, Publons: AAZ-6056-2021; antunemio@yandex.ru.

Вклад авторов:

Белый Г.И. — идея, научное руководство, научное редактирование текста.

Кубасевич А.Е. — сбор и обработка данных, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Artyukhov V.N., Shcherbakov E.A., Goritskiy V.M., Shneyderov G.R. On the condition of under-crane structures of converter production at OAO “Severstal”. *Industrial and Civil Engineering*. 2001; 6:31-34. (rus.).
2. Babkin V.I., Zhidkov K.E., Kapyrin N.V., Merzlikin A.V. On the issue of durability of welded under-crane beams. *Bulletin of Lipetsk State Technical University*. 2016; 1(27):46-49. EDN VSSNKT. (rus.).
3. Eremin K.I., Nashchekin M.V., Markov K.V., Gorbunov A.G. Damageability of under-crane beams of metallurgical and mining industry enterprises. *Science and Safety*. 2015; 3(16):59-77. EDN TYNUTT. (rus.).
4. Sklyadnev A.I., Serdyuk V.V. Fatigue durability and damage measure of the upper zone of the wall of welded under-crane beams. *Occupational Safety in Industry*. 2004; 11:34-36. EDN JVVWQP. (rus.).
5. Takki V.F., Egorov I.F., Tusnina O.A. Increasing the operational life of crane beams. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 12:61-67. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.61-67. EDN UIUJGJ. (rus.).
6. Feng Xiu-Jun, Lin Xin-Shan, Fan Tian. Research of fatigue damages of the upper zone of steel under-crane beam walls. *Industrial and Civil Engineering*. 1994; 11-12:33-35. (rus.).
7. Vasyuta B.N., Krylov I.I., Kukushko S.S. Towards the problem of determination of the residual resource of welded crane beams with fatigue failure. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2006; 6(570):114-120. EDN GZQGFV. (rus.).
8. Moskvichev V.V., Chaban E.A. Analysis of the fatigue cracks development in crane girders and assessment of their residual life. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2018; 84(7):47-54. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-47-54 (rus.).
9. Kubasevich A.E. *Stress-strain and ultimate states of under-crane beams with fatigue cracks in the wall : thesis of candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2023; 165. (rus.).
10. Dong S.E., Chen Q. Probe on the stress of the support crack of welded crane beams. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 501-504:710-716. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.710
11. Rettenmeier P., Roos E., Weihe S. Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects. *International Journal of Fatigue*. 2016; 82:179-187. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.04.009
12. Wardenier J., de Vries P., Timmerman G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 140:163-173. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.10.027
13. Ávila G., Palma E., De Paula R. Crane girder fatigue life determination using SN and LEFM methods. *Engineering Failure Analysis*. 2017; 79:812-819. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.027
14. Rykaluk K., Marcinczak K., Rowicki S. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders — locations, causes and calculations. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018; 18(1):69-82. DOI: 10.1016/j.acme.2017.05.003
15. Xu B., Wu Q. Stress fatigue crack propagation analysis of crane structure based on acoustic emission. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 109:104206. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104206
16. Zai J., Cao J., Bell A.J. The fatigue strength of box girders in overhead travelling cranes. *Journal of the Institution of Structural Engineers*. 1994; 72(23):401-405.
17. Veselov V.V. *Evaluation of operability of used steel under-crane beams : thesis of candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2005; 267. (rus.).
18. Markeev V., Borkov P. Forecasting of the residual life of metal beams sub-crane of industrial buildings of long service life. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021; 10:8-16. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-8-16. EDN: KBOFRU. (rus.).
19. Graciano C., Casanova E., Martínez J. Imperfection sensitivity of plate girder webs subjected to patch loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(7):1128-1133. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.02.006
20. Kulka J., Mantic M., Fedorko G., Molnar V. Analysis of crane track degradation due to operation. *Engineering Failure Analysis*. 2016; 59:384-395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.009
21. Belyy G.I., Kubasevich A.E. Bearing capacity of crane beams with fatigue cracks in the wall. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):24-29. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-24-29. EDN WCKLTW. (rus.).
22. Rafiev A.K., Maramov F.B. Strengthening of crane runway beams with the method of increase in thicknesses. *Polytechnic Herald. Series: Engineering Research*. 2020; 1(49):143-150. EDN CXCLUX. (rus.).
23. Rafiev A.K., Ashurov I.S.H. Building strengthening of crane runway beams with the method of structural scheme alteration. *Polytechnic Herald. Series: Engineering Research*. 2020; 3(51):99-107. EDN IBHRWU. (rus.).

Received August 28, 2023.

Adopted in revised form on September 17, 2023.

Approved for publication on September 17, 2023.

B I O N O T E S: **Grigory I. Belyy** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor-consultant of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 272945; office@erkon.ru;

Anton E. Kubasevich — senior lecturer of the Department of Metal and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1060856, ORCID: 0000-0002-5186-8518, Publons: AAZ-6056-2021; antunemio@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Grigory I. Belyy — idea, scientific guidance, scientific editing of the text.

Anton E. Kubasevich — data gathering, data processing, writing of the article.

The authors declare no conflicts of interest.

Особенности формирования структуры и свойств природного ангидрита при комплексной активации

Анастасия Федоровна Гордина, Ирина Сергеевна Полянских,
Александр Николаевич Гуменюк, Татьяна Анатолиевна Плеханова
*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ);
г. Ижевск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Предмет исследования — повышение физико-механических характеристик вяжущего на основе природного ангидрита Ергачевского месторождения, применение которого обеспечит производство строительных материалов на базе безобжиговых, малоэнергос затратных вяжущих. Для улучшения характеристик предлагается комплексная активация твердения. Оптимизированы составы от количества и содержания химического активатора. Предложено использование металлургической пыли в качестве дополнительного компонента комплексной добавки, обеспечивающего улучшение гидрофизических характеристик.

Материалы и методы. Для изготовления вяжущего природный ангидритовый камень дробили в щековой дробилке, измельчали в лабораторной дисковой мельнице. Определение прочностных параметров и установление оптимального активатора проводились с помощью гидравлического лабораторного пресса. Анализ химического состава металлургической пыли выполнен на рентгеновском флуоресцентном спектрометре с волновой дисперсией. Характер структурообразования и наличие новообразований определяли с использованием растровых электронных микроскопов и дифференциально-сканирующего калориметра.

Результаты. Проведен сравнительный анализ влияния активаторов твердения на прочностные характеристики вяжущего на основе природного ангидрита. Проанализирована активация сульфатом железа (мелантерит) и гидросульфитом натрия; гидроксидом натрия и калия; воздушной известью и цементом. Установлено, что применение химических активаторов приводит к повышению прочностных характеристик и изменению морфологии кристаллогидратов, оптимальным является мелантерит. Однако комплексное воздействие модификаторов достигается только при сочетании химических и минеральных активаторов твердения и обеспечивает не только повышение прочностных характеристик, но и водостойкости. Определено, что сочетание металлургической пыли и гидросульфита натрия обеспечивает формирование сульфата железа, которое при совместном введении с портландцементом способствует улучшению физико-механических характеристик.

Выводы. Комплексная активация твердения природного ангидрита обеспечивает формирование матрицы повышенной плотности, сложенной из кристаллогидратов гипса оптимальной морфологии, дополнительно связанных аморфными новообразованиями на основе гидросиликатов, гидросульфаталюмосиликатов или гидроферритов кальция, что обеспечивает физико-механические характеристики на уровне, достаточном для производства стеновых строительных блоков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: природный ангидрит, комплексная активация, металлургическая пыль, повышение водостойкости, активаторы твердения

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-3391.2022.4).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гордина А.Ф., Полянских И.С., Гуменюк А.Н., Плеханова Т.А. Особенности формирования структуры и свойств природного ангидрита при комплексной активации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1791–1801. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1791-1801

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Гуменюк, gumeniuk.an@gmail.com.

Structure formations and properties of natural anhydrite at complex activation

Anastasia F. Gordina, Irina S. Polyanskikh, Aleksandr N. Gumeniuk,
Tatiana A. Plekhanova
Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU); Izhevsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The subject of the research is the improvement of physical and mechanical characteristics of binder based on natural anhydrite from the Ergachevskoye deposit. The application of natural anhydrite will provide the production of construction materials on the basis of nonfired, low-energy-cost binders. Complex activation of hardening is offered for

improvement of physical and mechanical characteristics. The compositions from quantity and content of chemical activator are optimized. The use of metallurgical dust as an additional component of the complex additive, providing improvement of hydrophysical properties is proposed.

Materials and methods. For the production of binder natural anhydrite stone was crushed in a jaw crusher and ground in a laboratory disc mill. Determination of strength parameters and establishment of the optimum activator were carried out using a hydraulic laboratory press. The chemical composition of metallurgical dust was analyzed using X-ray fluorescent spectrometer with wave dispersion. The nature of structure formation and the presence of neoplasms were determined using scanning electron microscopes and a differential-scanning calorimeter.

Results. A comparative analysis of the influence of hardening activators on the strength characteristics of natural anhydrite-based binder was carried out. Activation by iron sulfate (melanterite) and sodium hydrosulfite; sodium and potassium hydroxide; air-setting lime and cement was analyzed. However, the complex effect of modifiers is achieved only with the combination of chemical and mineral hardening activators and provides not only an increase in strength characteristics, but also water resistance.

Conclusions. Complex activation of natural anhydrite hardening provides the formation of a matrix with increased density. The matrix is composed of gypsum crystalline hydrates of optimal morphology, additionally bonded by amorphous new formations based on hydrosilicates, hydrosulfoaluminosilicates or calcium hydroferrites. Such a structure provides physical and mechanical characteristics at a level sufficient for the production of wall building blocks.

KEYWORDS: natural anhydrite, complex activation, metallurgical dust, water resistance improvement, hardening activators

Acknowledgements. This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (МК-3391.2022.4).

FOR CITATION: Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Gumeniuk A.N., Plekhanova T.A. Structure formations and properties of natural anhydrite at complex activation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1791-1801. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1791-1801 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr N. Gumeniuk, gumeniuk.an@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Производство строительных материалов и изделий различного назначения сопряжено с дополнительным образованием и накоплением сопутствующих отходов, загрязнением окружающей среды, высокими затратами энергии, выделением существенного количества углекислого газа. В связи с этим актуальным становится широкое применение исходного природного сырья, переработка которого не требует значительных технологических переделов, сопровождающихся высокими расходами энергии и выбросами загрязняющих веществ. С этой точки зрения особый интерес вызывают экологически чистые природные ресурсы, при незначительной переработке которых возможно получение качественных материалов и изделий строительного назначения, такие как сульфатсодержащие вяжущие.

Российская Федерация обладает большими запасами природного гипса и ангидрита, образованных путем осаждения из природных вод, гидратации и дегидратации сульфата кальция [1, 2]. Номенклатура подобных вяжущих отличается разнообразием химического и минералогического состава, зависящих от расположения месторождения, условий формирования породы. Разнообразие состава и свойств определяет вариативность применения сырьевых ресурсов.

Имеется возможность использования природного ангидрита не только как вяжущего, но и в качестве компонента сложных смесей, для регулирования скорости гидратации, например механоактивированного мусковита. Введение природного ангидрита в количестве 5, 10, 15 % от массы мусковита снижает количество стратлингита, гидротальцита и гидросуль-

фоалюминатного геля, при этом увеличивается объем этtringита [3].

При высокой степени белизны вяжущего, более 90 %, возможно применение природного ангидрита в качестве наполнителя для отделочных покрытий, красок, отбеливания бумаги и картона. Пагиряйское месторождение в Литве отличается высокой чистотой ангидритовой породы. Природный ангидрит данного месторождения при преимущественно сульфатной активации за счет введения сульфата калия, гидросульфата калия совместно с сульфатом меди или сульфатом железа II на 7-е сутки показывает прочность от 20 до 60 МПа, что позволяет рассматривать его дополнительное применение в виде альтернативы высокообжиговым вяжущим [4].

Снижение энергоёмкости производства — основная из важнейших задач, с которой сталкивается производство строительных материалов и изделий. Неоспоримым преимуществом является внедрение производств малой энергоёмкости, так, например, на производство гипсового вяжущего расход топлива и электроэнергии в 4–5 раз ниже, чем на производство портландцемента, при этом производство гипсового вяжущего сопряжено с необходимостью дополнительных этапов, включающих обработку при повышенных температурах. Возможность снижения или полное исключение данного этапа из производственного процесса позволит дополнительно снизить производственные затраты.

Среди несомненных преимуществ сульфатсодержащих вяжущих и изделий на их основе следует отметить невысокую плотность, обеспечивающую легкость изделий, низкую тепло- и звукопроводность, достаточную прочность. Эти параметры определяют перспективность производства

стенowych изделий на основе сульфатсодержащих вяжущих.

Применение вяжущих на основе природного ангидрита отличается экономической эффективностью и привлекательностью для потенциальных инвесторов. Определение рентабельности производства и показателей коммерческой эффективности инвестиций в технологическую линию по производству стеновых камней на основе вяжущего из природного ангидрита показало окупаемость в течение 5 лет, рентабельность — в пределах 15–20 % и уровень безубыточности — 32–47 %.

При этом ключевыми проблемами, препятствующими широкому внедрению данного вяжущего, определены низкие гидрофизические характеристики [5], необходимость подбора оптимальной активации реакции гидратации для обеспечения набора необходимой прочности.

В целях обеспечения полноты протекания реакции предлагается использование преимущественно сульфатной, щелочной; щелочной и смешанной активации (сочетание щелочного и сульфатного компонентов) [6].

Также установлена возможность использования ультрадисперсного магнезита в виде магнезитового каустического порошка ПМК-75 с содержанием оксида магния 75 %. При применении этой добавки в количестве 2 % от массы вяжущего отмечены повышение прочностных характеристик с 7,5 до 14 МПа, значительные изменения морфологии ангидритовой матрицы, характеризующейся уплотнением новообразований, повышением площади контактов срастания кристаллов [7].

Одним из подходов к оптимизации физико-механических характеристик и повышению водостойкости сульфатсодержащих вяжущих служит регулирование скорости гидратации и условий кристаллизации новообразований, что позволяет достичь требуемых прочности и долговечности. Направления, обеспечивающие оптимизацию структуры и свойств, включают модификацию химическими добавками, дисперсное армирование неорганическими и органическими волокнами [8], применение дисперсных отходов производств.

Так, для активации природного ангидрита месторождения Аликанте (Испания) предлагается использовать доменный гранулированный шлак, молотое стекло, сульфат железа II, гидроксид кальция и цемент. Гранулированный доменный шлак, молотое стекло и природный гипс не изменяют степень гидратации природного ангидрита, использование двухвалентного железа приводит к значительному изменению цвета образцов. Установлено ускорение реакции гидратации при введении 3 % цемента и 1 % сульфата натрия, что обеспечивает прочность на сжатие до 27 МПа [9].

Одним из подходов является создание комплексных активаторов, представляющих многоком-

понентные добавки преимущественно сульфатной природы $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, $CuSO_4$, $ZnSO_4 \cdot H_2O$. Указанные активаторы позволяют направленно регулировать свойства природного ангидрита, способствуя увеличению степени гидратации, однако положительное влияние многокомпонентных активаторов на прочностные характеристики обеспечивается только при низких и средних концентрациях добавок [10, 11].

Также возможна комплексная активация твердения природного ангидрита. Для этого используют сочетание растворимого и дисперсного минерального компонентов, например сочетание сульфата натрия и портландцемента в количестве до 5 % от массы вяжущего [12].

Для природного ангидрита Порецкого месторождения (Чувашия), содержание сульфата кальция в породе которого достигает 85,47 %, предлагается применение комплексной активации в виде сочетания щелочного компонента (воздушной извести) в количестве от 1–5 % и коротковолокнистого асбеста в количестве от 10–30 %. Сочетание обеспечивает прирост прочности на 57 % до 17 МПа. Установлено, что добавки для ангидритового вяжущего должны обладать высокой удельной поверхностью и повышенной концентрацией положительно заряженных активных центров для обеспечения роли центров кристаллизации и наличием дефектов для облегчения кристаллизации новой фазы [13].

Известно, что, помимо низкой скорости гидратационного процесса, материалы на основе природного ангидрита характеризуются низкими показателями водостойкости [14]. Причины этого заключаются в высокой растворимости компонентов вяжущего, расклинивающим действии водных пленок, адсорбирующихся на внутренних полостях, наличие которых предопределяется высокой пористостью материалов на основе сульфатов. Увеличение параметров гидрофизических свойств возможно путем повышения плотности изделий гидрофобизацией, модифицирующими добавками, снижением растворимости сульфата кальция за счет направленного формирования нерастворимых соединений по поверхности растворимых новообразований.

Совместное введение в состав вяжущего на основе природного ангидрита 4 % микрокремнезема марки МК-85 и 5 % портландцемента обеспечивает рост прочности вяжущего Ергачевского месторождения (Кунгурский район, Пермский край) в 2 раза, приводя к повышению водостойкости до параметра 0,51, отмечено изменение условий гидратации ангидрита в сторону полноты протекания реакции [15].

Обожженный при температуре 800 °С гальванический шлак способствует повышению прочностных характеристик и увеличению коэффициента размягчения до 0,67 при введении в количестве 5 %, при этом его использование сокращает сроки начала и конца схватывания вяжущего [16, 17].

Альтернативный способ активации природного ангидрита — механическая активация дополнительным помолотом [18].

Совместный помол природного ангидрита с отвальным глиноземистым шлаком в количестве 10 и 30 %, содержащим преимущественно оксиды алюминия и кальция, приводит к значительным улучшениям прочностных характеристик материала. При 10 % шлак выполняет роль микронаполнителя, который служит центром кристаллизации в процессе гидратации; при содержании 30 % процесс твердения происходит по механизму кристаллизации на подложке, такой способ позволяет отказаться от использования химических активаторов [19], однако представляется ресурсозатратным.

Таким образом, природный ангидрит является оптимальным материалом строительного назначения, применение которого способствует снижению экологической нагрузки и углеродного следа.

Цель работы — исследование влияния комплексной модификации природного ангидрита, включающей дисперсные отходы промышленного производства, на изменение условий гидратации, особенности структурообразования и формирования свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения композиционного материала на минеральной основе в качестве основного компонента использовалась ангидритовая порода Ергачевского месторождения. Для изготовления образцов ангидритовый камень предварительно дробился в щековой дробилке ЩД-6, затем измельчался в лабораторной дисковой мельнице ИД-200 до удельной поверхности 3000 см²/г. В составе породы наряду с безводным сульфатом кальция присутствует двугидрат до 15 %, а также кварц менее 1 % (SiO₂) и доломит (CaMg(CO₃)₂) около 2 %.

В качестве техногенной добавки использовалась металлургическая пыль — отход производства стали, который скапливается на циклонах на предприятии ОАО «Ижсталь» (г. Ижевск). Анализ химического состава металлургической пыли был проведен на рентгеновском флуоресцентном спектрометре с волновой дисперсией Axios mAX (фирма PANalytical). В состав добавки входят следующие оксиды металлов: оксид железа (III) (Fe₂O₃) — 54 %, оксид магния (MgO) — 14 %, оксид кальция (CaO) — 12 %, оксид кремния (SiO₂) — 6 %. В качестве примесей (1–2 %) содержатся оксиды хрома (III), алюминия, марганца и цинка. Однако в процессе хранения часть оксидов металлов переходит в соответствующие гидроксиды, формируется аморфная фаза. Дисперсионный анализ добавки показал, что средний размер частиц составляет 50–80 мкм, однако более 50 % частиц порошка находится в диапазоне с размером частиц менее 35 мкм.

Микроструктура образцов исследовалась с помощью растровых электронных микроскопов Phenom G2 Pure и JSM-7500F фирмы JEOL с использованием ускоряющего напряжения 4 кВ и максимальным увеличением до 20 000 раз. Дифференциально-термический и термогравиметрический анализы выполнены с применением дифференциально-сканирующего калориметра TGA/DSC1 компании Mettler Toledo в диапазоне температур 60–1100 °C со скоростью нагрева 30 °C/мин.

Для определения физико-механических характеристик исследуемых составов изготавливались образцы-балочки размерами 40 × 40 × 160 мм. Распалубка образцов производилась через 24 ч, образцы до момента испытания хранились при $T = 20$ °C и относительной влажности воздуха 60 %. Испытания на прочность проводились в возрасте 7 и/или 28 дней на лабораторном прессе ПГМ-100МГ4. Для установления параметров водостойкости материалов использовались серии образцов балочек, испытания осуществлялись в соответствии с ГОСТ 23789–2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проведен сравнительный анализ влияния активаторов твердения на физико-механические свойства ангидритового вяжущего. Активаторы в зависимости от механизма воздействия были разделены на 3 группы: сульфатные (сульфат железа (мелантерит) FeSO₄·7H₂O и гидросульфит натрия NaHSO₃); щелочные (гидроксид натрия и калия); преимущественно щелочного действия (воздушная известь и ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Искитимцемент»). Концентрация активаторов твердения с учетом ранее проведенных исследований [6, 10, 11] варьировалась от 1 до 3 % с шагом 1 %.

Улучшение прочностных параметров и характеристик водостойкости материалов возможно при введении комплексных добавок, которые не только способствуют формированию матрицы повышенной плотности, но и инициируют процесс образования малодиссоциирующих в воде продуктов гидратации. К модификаторам, отвечающим приведенным требованиям, можно отнести металлургические отходы производства в виде пыли и шлаков.

Установлено, что процессы структурообразования природного ангидрита протекают медленно и переход в двугидрат сульфата кальция осуществляется частично, не в полном объеме матрицы. Одним из основных способов ускорить и интенсифицировать процессы гидратации и твердения являются активаторы твердения различной природы.

В исследовании выполнен сравнительный анализ прочностных характеристик ангидритового вяжущего при введении различных активаторов твердения после 28 сут твердения материала (рис. 1).

Проведенные исследования позволили установить, что наибольший рост прочностных характери-

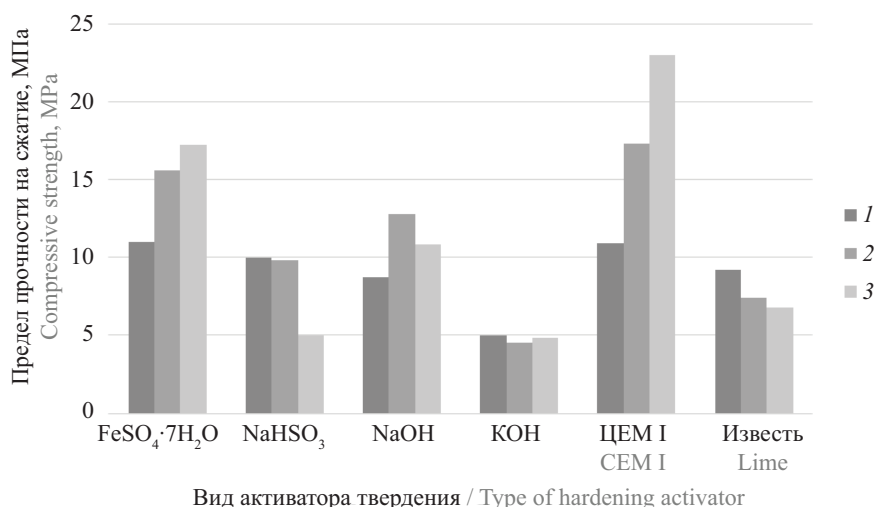


Рис. 1. Прочность на сжатие ангидритового вяжущего при введении различных активаторов твердения на 28 сут твердения: 1, 2, 3 — соответствуют прочностным характеристикам материала при введении активаторов твердения в количестве 1, 2, 3 % от массы вяжущего соответственно

Fig. 1. Compressive strength of anhydrite binder with different hardening activators after 28 days of hardening: 1, 2, 3 — compressive strength of composites with hardening activators in the amount of 1, 2, 3 % of the binder weight, respectively

стик обеспечивается при введении портландцемента и сульфата железа. Сульфатная активация природного ангидрита дает возможность значительно сократить сроки схватывания материала, однако при повышении концентрации на поверхности образцов наблюдается формирование высолов. Щелочная активация вяжущего в виде гидроксида натрия, калия и кальция улучшает растворимость сульфатов и стабилизирует объем матрицы при твердении, вместе с тем новых продуктов гидратации не формируется и водостойкость материала практически не изменяется. Добавление портландцемента обеспечивает увеличение механических параметров природного ангидрита, не только способствуя более полному переходу ангидрита в двухводный гипс, но и создавая благоприятные условия для формирования малодиссоциирующих в воде продуктов на основе гидросиликатов и гидросульфатоалюминатов кальция. В то же время, когда концентрация активатора не превышает 5 %, внутренних напряжений при длительном выдерживании в матрице не возникает.

Анализ микроструктуры природного ангидритового камня при введении различных активаторов твердения представлен на рис. 2. Морфология контрольного состава, затворенного водой без активаторов, отличается неоднородностью, большим количеством пор и пустот в объеме матрицы. Можно отметить, что таблитчатых кристаллов гипса в структуре материала незначительное количество, размер кристаллов не превышает 10–20 мкм, при этом отмечены крупные кристаллы ангидрита. Элементы структуры мало связаны между собой, что свидетельствует о неполноте прохождения процессов гидратации и объясняет низкие значения прочностных параметров (не более 2,5–3 МПа на сжатие в возрасте 28 дней).

При введении активаторов в состав природного ангидрита формируются благоприятные условия для гидратации, в структуре матрицы наблюдается образование таблитчатых кристаллов гипса, размеры которых варьируются в широком диапазоне от 5–10 мкм и достигают до 30 мкм в поперечном сечении. Нужно отметить, что в сравнении с контрольным составом в структуре материала при введении химических добавок значительно меньше кристаллов сульфата кальция, морфология камня более плотная и снижается количество пор. При этом добавление портландцемента способствует формированию аморфных продуктов на основе гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, игольчатых кристаллов гидросульфатоалюмосиликатов кальция, которые дополнительно связывают элементы матрицы и заполняют поровое пространство.

Дифференциально-термический анализ проводился для ангидритовых составов, полученных с использованием в качестве активатора твердения портландцемента и сульфата железа, при введении которых наблюдается наибольший прирост прочностных характеристик. Полученные термограммы представлены на рис. 3.

Анализ полученных данных позволил установить следующие термические процессы:

- эндотермический эффект в диапазоне температур 100–300 °С, обусловленный процессами дегидратации компонентов матрицы. При сульфатной активации отмечен двойной эндотермический эффект, что свидетельствует о большом содержании гипса в составе матрицы, потеря массы составляет более 15 %. При введении цемента потеря массы в рассматриваемом диапазоне температур — 7,2 %, виден один эндозэффект, что обусловлено формиро-

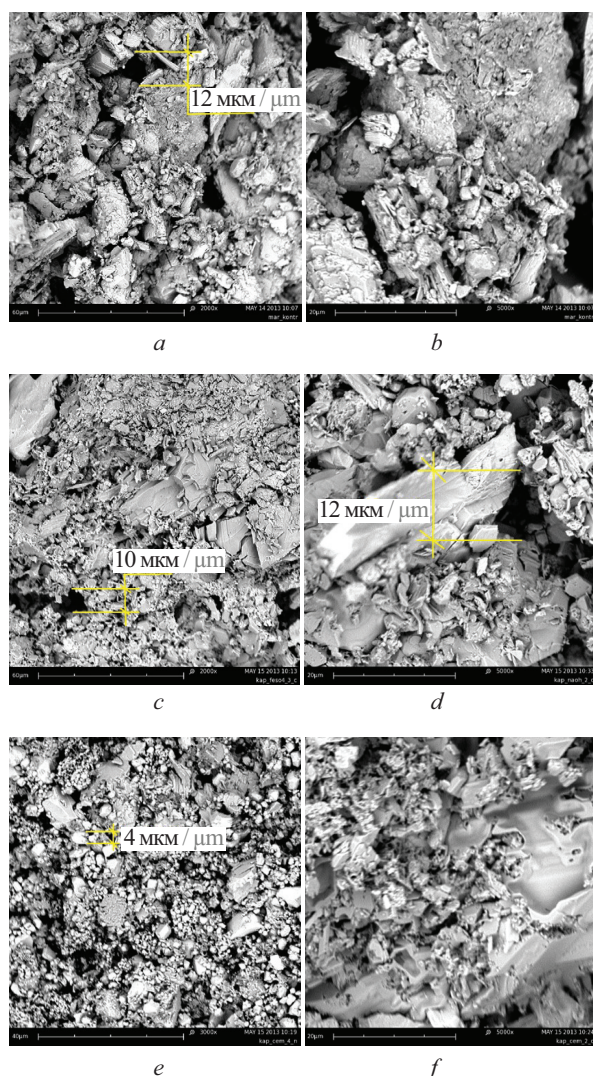


Рис. 2. Микроструктура материала на основе природного ангидрита: *a, b* — контрольный состав при увеличении $\times 2000$ и $\times 5000$; *c* — образец с введением 3 % $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ при увеличении $\times 2000$; *d* — образец с введением 2 % NaOH при увеличении $\times 5000$; *e, f* — образец с введением 3 % ЦЕМ I при увеличении $\times 3000$ и $\times 5000$

Fig. 2. Microstructure of natural anhydrite-based composites: *a, b* — control composition under magnification $\times 2,000$ and $\times 5,000$; *c* — sample with 3 % $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ under magnification $\times 2,000$; *d* — sample with 2 % NaOH under magnification $\times 5,000$; *e, f* — sample with 3 % CEM I under magnification $\times 3,000$ and $\times 5,000$

ванием новообразований на основе гидросиликатов и гидросульфаталюминатов кальция;

- экзотермический эффект при температуре $387,5/418,5$ °C связан с перекристаллизацией ангидрита;
- эндотермический эффект при температуре свыше 750 °C обусловлен процессами диссоциации карбоната кальция, а при введении цемента также и аморфных продуктов.

Таким образом, проведенные физико-химические исследования подтвердили благоприятное

влияние активаторов твердения на состав и структуру ангидритовой матрицы, способствующих значительному повышению физико-механических свойств материала. При этом параметры водостойкости ангидритовых материалов при введении активаторов незначительны: коэффициент размягчения увеличился при введении портландцемента до 0,5, при добавлении других химических добавок изменения незначительны.

В исследовательских работах авторов о влиянии дисперсных минеральных добавок на структуру и свойства гипсовых композиций определен оптимальный техногенный модификатор — металлургическая пыль. При введении металлургической пыли в состав гипсового вяжущего достигается повышение прочности на сжатие до 65 % и увеличение водостойкости материала до 0,8, поэтому было принято решение о совместной, комплексной активации твердения природного ангидрита металлургической пылью с активаторами.

Для сульфатной активации твердения природного ангидрита выбран гидросульфит натрия NaHSO_3 в концентрации 1 %, поскольку в составе техногенного модификатора преобладают оксиды железа в процессе структурообразования будет формироваться сульфат железа, оказывающий наиболее благоприятное воздействие на процессы гидратации вяжущего (рис. 1). Для сравнения был использован преимущественно щелочной активатор твердения ангидрита — портландцемент (ЦЕМ I 42,5Н) в количестве 3 %.

Результаты испытаний физико-механических свойств ангидритовых композиций с добавлением дисперсной техногенной добавки и разных видов активаторов приведены на рис. 4.

При комплексной активации природного ангидрита гидросульфитом натрия и металлургической пылью происходит увеличение прочности на сжатие образцов на 72 %, а при щелочной активации на 54 %. Повышение механических показателей может происходить по двум механизмам: добавка повышает растворимость ангидритового вяжущего или оказывает структурирующее воздействие на матрицу, способствуя увеличению площади межфазной поверхности, формированию более прочных контактов или инициируя процесс образования новых продуктов гидратации. Судя по улучшению показателей прочности с увеличением возраста образцов, структурирующий механизм более предпочтителен, так как действие гидроксида кальция со временем прекращается, а дисперсные частицы оксида железа способствуют дальнейшему уплотнению матрицы за счет образования сульфата железа (III), который активизирует гидратацию природного ангидрита с заполнением пор и дефектов структуры продуктами твердения.

Микроструктурный анализ контрольных составов (рис. 2, *a, b*) показал, что формируется рыхлая



Рис. 3. Дифференциально-термический и термогравиметрический анализ ангидритового вяжущего с использованием в качестве активатора твердения ЦЕМ I (а) и сульфата железа (б) в количестве 3 % от массы вяжущего

Fig. 3. DTA and TG of natural anhydrite with CEM I as a hardening accelerator (a) and ferrous sulphate (b) 3 % by binder mass

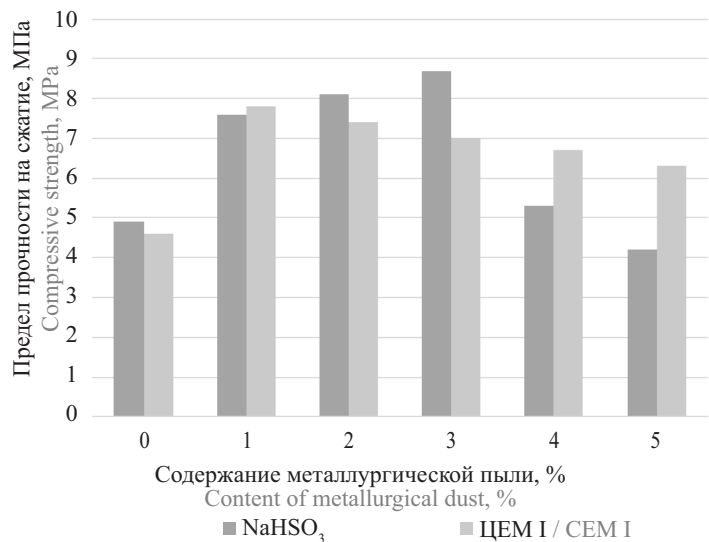


Рис. 4. Зависимость прочности ангидритового вяжущего при комплексной активации твердения от содержания металлургической пыли в возрасте 7 дней

Fig. 4. Dependence of anhydrite binder strength at complex hardening activation on the content of metallurgical dust after 7 days of hardening

и неупорядоченная структура, состоящая из кристаллов различной морфологии и размера, что приводит к значительной пористости, уменьшению межфазных контактов и снижению физико-механических характеристик. При введении техногенной добавки совместно с гидросульфитом натрия образуется более плотная мелкокристаллическая структура (рис. 5), которая обеспечивает увеличение площади контактов между кристаллическими новообразованиями, что приводит к повышению прочности ангидритовой матрицы. Известно, что прочность материала определяется не только количеством кристаллогидратов, но и количеством и прочностью контактов между ними [20].

В структуре матрицы с добавлением металлургической пыли, кроме мелких кристаллов, присутствуют крупные, хорошо оформленные кристаллы двуводного сульфата кальция призматической фор-

мы (рис. 5, b). На поверхности кристаллогидратов гипса присутствует большое количество высокодисперсных продуктов твердения, которые дополнительно связывают и уплотняют структуру материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить, что оптимальный прирост прочности вяжущего на основе природного ангидрита обеспечивается на 28 сут твердения при отдельной активации портландцементом и сульфатом железа в диапазоне 1–3 % от массы вяжущего, при превышении данного диапазона при сульфатной активации инициируется образование высолов, щелочная активация приводит к повышению прочностных характеристик, не влияя на гидрофизические параметры, введение портландцемента комплексно воздействует на матрицу из природного ангидрита, способствуя повышению плотности, прочности и водостойкости.

При введении комплексного модификатора в виде портландцемента и сульфатов железа, образующихся при взаимодействии гидросульфита натрия и дисперсного техногенного отхода производства, обеспечивается рост механических показателей природного ангидрита. Благоприятные условия при гидратации и твердении ангидритового вяжущего обеспечивают формирование матрицы повышенной плотности, сложенной из кристаллогидратов гипса призматической или таблитчатой формы, дополнительно связанных аморфными новообразованиями на основе гидросиликатов, гидросульфаталюмосиликатов или гидроферритов кальция, которые способствуют улучшению гидрофизических характеристик.

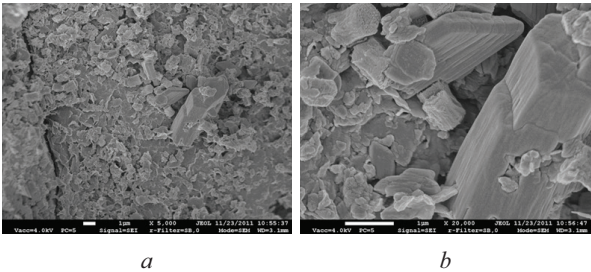


Рис. 5. Микроструктура ангидритовой композиции при совместной активации твердения металлургической пылью и гидросульфитом натрия при увеличениях: a — ×5000; b — ×20 000

Fig. 5. Microstructure of anhydrite composition at complex hardening activation by metallurgical dust and sodium hydrosulphite under magnification: a — ×5,000; b — ×20,000

Данные дифференциально-термического и термогравиметрического анализа подтвердили благоприятное влияние активаторов на состав ангидритовых материалов, так при введении сульфатного активатора наблюдается появление термических эффектов (двойной эндотермический эффект в диапазоне температур 100–300 °С), обусловленных большим содержанием двуводного сульфата кальция в структуре матрицы, а введение портландцемента обеспечивает формирование продуктов на основе

гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, наличие которых подтверждено изменением характера пиков диссоциации в диапазонах температур 100–300 °С и 700–900 °С, способствующих улучшению физико-механических параметров материала.

Предполагается дальнейшая оптимизация составов, расширение линейки возможных изделий за счет введения заполнителей для производства теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных изделий на основе безобжигового ангидритового вяжущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов К.Н. Строительные материалы и изделия : учебник. М. : Высшая школа, 2001. 366 с.
2. Ферронская А.В. Гипс — эколого-экономические аспекты его применения в строительстве // Строительные материалы. 1999. № 4. С. 13–15.
3. Yao G., Cui T., Jia Z., Sun S., Anning C., Qiu J. et al. Effect of anhydrite on hydration properties of mechanically activated muscovite in the presence of calcium oxide // Applied Clay Science. 2020. Vol. 196. P. 105742. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105742
4. Žvironaitė J., Kizinievič V. Researches into possibility of application of Lithuanian anhydrite // Modern Building Materials, Structures and Techniques : 10th International Conference. 2010. Pp. 346–350.
5. Каклюгин А.В., Трищенко И.В., Козлов А.В., Чижов А.В. Стеновые камни на основе безобжигового ангидритового вяжущего // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 3 (18). С. 70–77. DOI: 10.21285/2227-2917-2016-3-70-77. EDN WMNBVP.
6. Фишер Х.-Б., Второв Б. Влияние активаторов твердения на свойства природного ангидрита // II Междунар. совещание по химии и технологии цемента. Т. 2. 2000. С. 53–61.
7. Токарев Ю.В., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф. Ангидритовые композиции, модифицированные ультрадисперсной добавкой на основе MgO // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 17–19.
8. Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве // Российский химический журнал. 2003. Т. XLVII. № 4. С. 18–25.
9. Lillo-Polo C. Optimization of the activation process for natural anhydrite. ZKG 1. 2021.
10. Фишер Х.Б., Второв Б.Б., Бурьянов А.Ф. Исследование влияния многокомпонентных активаторов твердения на свойства природного ангидрита // Строительные материалы. 2023. № 1–2. С. 63–68. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-63-68. EDN ANOOUЕ.
11. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б., Гальцева Н.А., Махортов Д.Н., Хасанишин Р.Р. Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего // Строительные материалы. 2020. № 7. С. 4–9. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9. EDN ZTOEJI.
12. Gazdič D., Stachová J., Magrla R. Modification of natural anhydrite by mixed exciter // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1100. Pp. 56–59. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.56
13. Трунилова Д.С., Гаркави М.С., Шленкина С.С. Особенности твердения ангидрита в присутствии извести и асбеста // Вестник ЮУрГУ. Серия: строительство и архитектура. 2010. № 15 (191). С. 54–55. EDN MNJOMT.
14. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. М. : Стройиздат, 1951. 418 с.
15. Рузина Н.С., Чулкин Н.Н., Холмогоров М.Е. Композиционное вяжущее на основе природного ангидрита с техногенной добавкой // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 1. № 11 (28). С. 614–617. EDN YULARV.
16. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Kazantseva A., Gaynetdinova D. Binders based on natural anhydrite and modified by finely-dispersed galvanic and petrochemical waste // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 1022–1028. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.129
17. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Mikhailova O., Pudov I., Faizullin R. et al. Line of approach to a problem of water resistance of anhydrite cements // Procedia Engineering. 2017. Vol. 172. Pp. 982–990. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.124
18. Sievert T., Wolter A., Singh N.B. Hydration of anhydrite of gypsum (CaSO₄·II) in a ball mill // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Issue 4. Pp. 623–630. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.02.010
19. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодяжная Е.В., Бурьянов А.Ф. Композиционное ангидритово-шлаковое вяжущее центробежно-ударного измельчения // Строительные материалы. 2014. № 7. С. 16–18. EDN SHPHPR.
20. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. Л. : Стройиздат, 1974. 80 с.

Поступила в редакцию 19 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 18 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 19 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Анастасия Федоровна Гордина — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ); 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; РИНЦ ID: 6196-8655, Scopus: 55987955900, ResearcherID: F-5320-2017, ORCID: 0000-0001-8118-8866; afspirit@rambler.ru;

Ирина Сергеевна Полянских — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ); 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; SPIN-код: 604708, Scopus: 56789978800, ResearcherID: M-7100-2015, ORCID: 0000-0003-1331-9312; irina_maeva@mail.ru;

Александр Николаевич Гуменюк — старший преподаватель кафедры строительных материалов, механизации и геотехники; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ); 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; РИНЦ ID: 1005232, Scopus: 57204363802, ResearcherID: AАН-1846-2021, ORCID: 0000-0002-2880-8103; aleksandrmenyuk2017@yandex.ru;

Татьяна Анатольевна Плеханова — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ); 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; РИНЦ ID: 409717, ORCID: 0000-0002-5344-3409; tatyana-plekhanova2016@yandex.ru.

Вклад авторов:

Гордина А.Ф. — научное руководство, концепция исследования, анализ результатов.

Полянских И.С. — написание исходного текста, итоговые выводы.

Гуменюк А.Н. — изготовление образцов, проведение физико-технических испытаний, научное редактирование.

Плеханова Т.А. — обработка результатов физико-химических исследований, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Popov K.N. *Construction and buildings : textbook*. Moscow, Higher School, 2001; 366. (rus.).
2. Ferronskaya A.V. Gypsum-environmental and economic aspects of its application in construction. *Construction and Building Materials*. 1990; 4:13-15. (rus.).
3. Yao G., Cui T., Jia Z., Sun S., Anning C., Qiu J. et al. Effect of anhydrite on hydration properties of mechanically activated muscovite in the presence of calcium oxide. *Applied Clay Science*. 2020; 196:105742. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105742
4. Žvironaitė J., Kiziničevič V. Researches into possibility of application of Lithuanian anhydrite. *Modern Building Materials, Structures and Techniques : 10th International Conference*. 2010; 346-350.
5. Kakliugin A.V., Trischenko I.V., Kozlov A.V., Chizhov A.V. Wall stones based on unburnt synthanite. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2016; 3(18):70-77. DOI: 10.21285/2227-2917-2016-3-70-77. EDN WMNBBP. (rus.).
6. Fischer H.-B., Vtorov B. Impact of hardening accelerators on properties of natural anhydrite. *II International meeting about chemistry and cement processing. Vol. 2*. 2000; 53-61. (rus.).
7. Tokarev Yu.V., Yakovlev G.I., Buryanov A.F. Anhydrite based composites with ultradispersed MgO additive. *Construction and Building Materials*. 2012; 7:17-19. (rus.).
8. Korovyakov V.F. Gypsum based binders and its application in construction. *Russian Chemical Journal*. 2003; XLVII(4):18-25. (rus.).
9. Lillo-Polo C. *Optimization of the activation process for natural anhydrite*. ZKG 1. 2021.
10. Fisher H.B., Wtorov B.B., Buryanov A.F. Study of the effect of multicomponent hardening activators on the properties of natural anhydrite. *Construction Materials*. 2023; 1-2:63-68. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-63-68. EDN ANOOUE. (rus.).
11. Buryanov A.F., Fisher H.B., Galtseva N.A., Machortov D.N., Hasanshin R.R. Research in the influence of various activating additives on the properties of anhydrite binder. *Construction Materials*. 2020; 7:4-9. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9. EDN ZTOEJI. (rus.).
12. Gazdič D., Stachová J., Magrla R. Modification of natural anhydrite by mixed exciter. *Advanced Materials Research*. 2015; 1100:56-59. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.56
13. Trunilova D.S., Garkavi M.S., Shlenkina S.S. Peculiarities of maturing of anhydrite in the lime and mountain flax presence. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2010; 15(191):54-55. EDN MNJOMT. (rus.).
14. Budnikov P.P. *Gypsum, its research and application*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1951; 418. (rus.).

15. Ruzina N.S., Chulkin N.N., Kholmogorov M.E. Composite material based on natural anhydrite with a by-product additive. *Modern Research and Design*. 2018; 1(11):614-617. EDN YULARV. (rus.).
16. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Kazantseva A., Gaynetdinova D. Binders based on natural anhydrite and modified by finely-dispersed galvanic and petrochemical waste. *Procedia Engineering*. 2013; 57:1022-1028. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.129
17. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Mikhailova O., Pudov I., Faizullin R. et al. Line of approach to a problem of water resistance of anhydrite cements. *Procedia Engineering*. 2017; 172:982-990. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.124
18. Sievert T., Wolter A., Singh N.B. Hydration of anhydrite of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{II}$) in a ball mill. *Cement and Concrete Research*. 2005; 35(4):623-630. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.02.010
19. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodyazhnaya E.V., Buryanov A.F. Anhydrite-slag binder made by centrifugal-impact grinding. *Construction Materials*. 2014; 7:16-18. EDN SHPHPR. (rus.).
20. Sychev M.M. *Process of hardening of binders*. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1974; 191. (rus.).

Received June 19, 2023.

Adopted in revised form on September 18, 2023.

Approved for publication on September 19, 2023.

Bionotes: **Anastasia F. Gordina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials, Mechanization and Geotechnics; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation; SPIN-code: 6196-8655, Scopus: 55987955900, ResearcherID: F-5320-2017, ORCID: 0000-0001-8118-8866; afspirit@rambler.ru;

Irina S. Polyanskikh — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials, Mechanization and Geotechnics; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation; ID RSCI: 604708, Scopus: 56789978800, ResearcherID: M-7100-2015, ORCID: 0000-0003-1331-9312; irina_maeva@mail.ru;

Aleksandr N. Gumeniuk — senior lecturer of the Department of Construction Materials, Mechanization and Geotechnics; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation; ID RSCI: 1005232, Scopus: 57204363802, ResearcherID: AAH-1846-2021, ORCID: 0000-0002-2880-8103; aleksandrgumenyuk2017@yandex.ru;

Tatiana A. Plekhanova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials, Mechanization and Geotechnics; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation; ID RSCI: 409717, ORCID: 0000-0002-5344-3409; tatiana-plekhanova2016@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Anastasia F. Gordina — scientific supervision, conceptualization, data processing.

Irina S. Polyanskikh — writing of the article, final conclusion.

Aleksandr N. Gumeniuk — sample production, conducting physical and technical tests, scientific editing of the text.

Tatiana A. Plekhanova — processing the results of physicochemical tests, text revision.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Разработка методики и программы расчета параметров
воздуха при кондиционировании и вентиляции
крытых катков

Сергей Владимирович Чуйкин

Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В помещениях с искусственным льдом, к которым относятся крытые катки и ледовые арены, для предотвращения размывания льда, образования тумана и выпадения конденсата конвективная составляющая теплообмена должна расходоваться на охлаждение воздуха зоны ледового поля до нормируемых значений. От точности расчета микроклиматических параметров зависит не только комфорт находящихся на поле людей, но и качественные характеристики льда. Актуальна разработка методики и программы расчета указанных параметров при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Материалы и методы. Для повышения точности расчета предложена новая методика аналитического определения параметров состояния воздуха в зоне ледового поля крытых катков и ледовых арен. Данная методика отличается от существующих применением итерационного метода расчета при выборе оптимального соотношения расходов воздуха на первой и второй ступенях рециркуляции, что позволяет исключить дополнительное охлаждение притока в холодный период года.

Результаты. Разработанная методика реализована при составлении алгоритма программы расчета искомых параметров и учитывает современные данные численного моделирования температурных полей в обслуживаемой зоне, скорректированный диапазон величины градиента температуры по высоте рассматриваемого помещения и коэффициента массообмена, определяемого с помощью теории тройной аналогии тепломассообменных процессов.

Выводы. Предложенная методика и программа расчета дают возможность повысить точность определения температуры, влагосодержания, парциального давления и энтальпии при проектировании систем вентиляции и кондиционирования помещений с искусственным льдом, что способствует сокращению избыточных энергетических затрат при обработке воздуха в центральном кондиционере.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вентиляция, кондиционирование, *Id*-диаграмма, процессы обработки воздуха, вентиляция крытых катков, параметры состояния, автоматизированное проектирование

Благодарности. Автор выражает благодарность коллегам и рецензентам за профессиональный и ответственный подход к работе.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чуйкин С.В. Разработка методики и программы расчета параметров воздуха при кондиционировании и вентиляции крытых катков // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1802–1812. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1802-1812

Автор, ответственный за переписку: Сергей Владимирович Чуйкин, ser.chu@mail.ru.

Development of methodology and programme for calculation
of air parameters for air conditioning and ventilation of indoor
skating rinks

Sergey V. Chuykin

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

ABSTRACT

Introduction. In premises with artificial ice, which include indoor ice rinks and ice arenas, in order to prevent ice softening, fog formation and condensate precipitation, the convective component of heat exchange should be spent on cooling the air of the ice field area to standardized values. Thus, the accuracy of the calculation of microclimatic parameters depends not only on the comfort of people on the field, but also on the qualitative characteristics of the ice. The presented article is devoted to the development of a methodology and a programme for calculating these parameters when designing ventilation and air conditioning systems.

Materials and methods. To improve the calculation accuracy, a new method of analytical determination of air condition parameters in the ice field area of indoor ice rinks and ice arenas is proposed. This method differs from the existing ones by application of iterative calculation method when choosing the optimal ratio of air flow rates at the first and second stages of recirculation, which makes it possible to exclude additional cooling of the inflow during the cold season.

Results. The developed method is implemented in the algorithm of the programme for calculation of the required parameters and takes into account the modern data of numerical modelling of temperature fields in the served area, the corrected range

of the temperature gradient value by the height of the room under consideration and the mass transfer coefficient determined using the theory of triple analogy of heat and mass transfer processes.

Conclusions. The proposed methodology and calculation programme make it possible to increase the accuracy of determining temperature, moisture content, partial pressure and enthalpy determination when designing ventilation and air conditioning systems for rooms with artificial ice, which contributed to the reduction of excessive energy costs when processing air in the central air conditioner.

KEYWORDS: ventilation, air conditioning, *Id* diagram, air treatment processes, indoor ice rink ventilation, condition parameters, computer-aided design

Acknowledgements. The author expresses gratitude to the editorial board and reviewers for their professional and responsible approach to the work.

FOR CITATION: Chuykin S.V. Development of methodology and programme for calculation of air parameters for air conditioning and ventilation of indoor skating rinks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1802-1812. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1802-1812 (rus.).

Corresponding author: Sergey V. Chuykin, ser.chu@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Помещения с искусственным льдом, к которым относятся крытые катки и ледовые арены, в зависимости от вида проводимых спортивных и культурно-массовых мероприятий могут иметь различные архитектурно-строительные и планировочные решения, влияющие на подход к организации и проектированию систем жизнеобеспечения. Однако определяющим фактором при создании требуемого микроклимата рассматриваемых зданий является наличие обширной охлаждающей поверхности. В последние годы с помощью современных вычислительных средств был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований формирования тепловлажностного и воздушного режимов данных объектов [1–8], что позволило повысить точность получаемых результатов. Тем не менее, ввиду сложности и трудоемкости составления физико-математических моделей в современных программных средах, по-прежнему наибольшим распространением пользуется графоаналитическая методика, изложенная в трудах О.Я. Кокорина [9, 10]. Поскольку испарение и конденсация влаги при взаимодействии ледового поля с окружающим воздухом протекают по границам кристаллов [11, 12], что объясняется меньшей термодинамической устойчивостью границ по сравнению с основной массой кристалла, необходимо стремиться к заливке относительно монолитного слоя льда с крупной кристаллической структурой.

Ключевые проблемы и задачи при формировании более качественного ледового покрытия рассматриваются в работах [11–15], отмечается, что главным условием при теплотехническом расчете холодильного оборудования для заливки льда служит компенсация им тепловых притоков к поверхности льда от окружающей среды, величина которых определяется интенсивностью радиационно-конвективного теплообмена.

Таким образом, большое значение приобретает точность расчета параметров микроклимата, в значительной степени влияющих на тепловой баланс обслуживаемой зоны помещения и его поверхностей. Вышесказанное показывает возросшую акту-

альность разработки новых методов расчета температуры, влажности, энтальпии и других параметров состояния влажного воздуха, что и является основной целью данной статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим более подробно существующую методику определения полного теплового потока к поверхности льда при ее радиационно-конвективном теплообмене с окружающим воздухом. Принято считать, что теплопритоки можно найти с помощью равенства [15–17]:

$$Q_{\text{т.л.пов}} = Q_{\text{т.кон}} + Q_{\text{т.луч}} + Q_{\text{т.св}}^e + Q_{\text{т.св}}^n + Q_{\text{т.люд}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{т.кон}}$ — конвективный приток теплоты от воздуха к поверхности льда, Вт; $Q_{\text{т.луч}}$ — приток лучистой теплоты от ограждающих конструкций и поверхностей к поверхности льда, Вт; $Q_{\text{т.св}}^e$ — приток лучистой теплоты от естественного освещения, Вт; $Q_{\text{т.св}}^n$ — теплопритоки к поверхности льда от осветительных приборов, Вт; $Q_{\text{т.люд}}$ — теплопритоки от людей на льду и в прилегающих зонах, Вт.

Величина конвективных притоков определяется по уравнению Ньютона – Рихмана, которое для рассматриваемого объекта принимает вид [9, 15–17]:

$$Q_{\text{т.кон}} = F_{\text{л}} \cdot \alpha_{\text{кон}} (t_{\text{в}}^{\text{н}} - t_{\text{л}}), \quad (2)$$

где $F_{\text{л}}$ — площадь ледового поля, м²; $\alpha_{\text{кон}}$ — коэффициент теплоотдачи ледовой поверхности, Вт/(м²·град); $t_{\text{в}}^{\text{н}}$ — температура воздуха в зоне ледового поля, °C; $t_{\text{л}}$ — температура поверхности льда, °C.

Коэффициент теплоотдачи может определяться по эмпирическим зависимостям:

- методика ASHRAE (СИА):

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{I}} = 3,41 + 3,55 \cdot v_{\text{л}}, \quad (3)$$

где $v_{\text{л}}$ — скорость воздуха у поверхности ледового поля, м/с;

- методика из справочника «Различные области применения холода» А.В. Быкова при вынужденном конвективном теплообмене для открытых катков:

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{II}} = 0,037 \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{в}}}{\nu_{\text{в}}^{0,8}} \right) w_{\text{в}}^{0,8} \cdot l^{-0,2}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C); $\nu_{\text{в}}$ — кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с; $w_{\text{в}}$ — среднемесячная скорость ветра в расчетный период, м/с; l — линейный размер поля в направлении движения ветра, м;

• методика из справочника «Различные области применения холода» А.В. Быкова для крытых катков:

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{III}} = \alpha_{\text{кон}}^{\text{к.к.}} \cdot \xi, \quad (5)$$

где ξ — коэффициент влаговыпадения, учитывающий выделение тепла при конденсации влаги на теплообменной поверхности.

Приток лучистой теплоты от потолка к поверхности льда принято рассчитывать по формуле:

$$Q_{\text{т.луч}} = F_{\text{л}} \cdot q_{\text{луч}} \cdot \beta_{\text{отр}}, \quad (6)$$

где $q_{\text{луч}}$ — плотность лучистого теплового потока к поверхности льда от строительных конструкций и ограждающих поверхностей, Вт/м²; $\beta_{\text{отр}}$ — коэффициент отражения (зависит от материала поверхности или конструкции).

Плотность лучистого притока теплоты в общем случае определяется по известной зависимости:

$$q_{\text{луч}} = c_{\text{п}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi, \quad (7)$$

где $c_{\text{п}}$ — приведенный коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); T_1 и T_2 — температуры взаимодействующих поверхностей, К; φ — коэффициент облучения, учитывает взаимное расположение поверхностей теплообмена.

Приток лучистой теплоты от естественного освещения рассчитывают по формуле:

$$Q_{\text{т.св}}^{\text{е}} = F_{\text{ок}} \cdot q_{\text{ок}} \cdot B_{\text{ок}}, \quad (8)$$

где $F_{\text{ок}}$ — площадь светового проема; $q_{\text{ок}}$ — удельный тепловой поток через остекление, Вт/м²; $B_{\text{ок}}$ — поправочный коэффициент влияния вида остекления.

Теплопритоки к поверхности льда от осветительных приборов можно найти с помощью приближенной зависимости:

$$Q_{\text{т.св}}^{\text{н}} = 0,6 \cdot F_{\text{л}} \cdot q_{\text{осв}}, \quad (9)$$

где $q_{\text{осв}}$ — удельные тепловыделения от световых приборов, Вт/м².

Теплопритоки от людей на льду и в прилегающих зонах устанавливают по формуле:

$$Q_{\text{т.люд}} = n \cdot q_{\text{люд}}, \quad (10)$$

где n — количество спортсменов и судей; $q_{\text{люд}}$ — удельные тепловыделения от людей, Вт.

Необходимый объемный расход подаваемого воздуха определяется из условий равномерного заполнения зоны ледового поля приточным воздухом и создания предпосылок для понижения температуры притока до требуемого значения у поверхности льда. Подвижность воздуха у поверхности льда ограничивается величиной 0,3 м/с, в противном случае в зонах превышения этого показателя качество льда ухудшается. Добиться выполнения этого требования возможно лишь при омывании ледового поля обратными потоками, индуцируемыми направленными струями. Расчет воздухораспределения при этом принято называть расчетом по обратному потоку, а за нормируемую скорость в обратном потоке принимается максимально допустимая скорость в обслуживаемой зоне.

Исходными данными при расчете микроклиматических параметров воздуха в обслуживаемой зоне помещений с искусственным льдом являются: расход притока (определенный из вышеупомянутых условий); температура и влажность наружного воздуха и воздуха в обслуживаемой зоне, которые зависят от вида проводимых мероприятий и климатической характеристики района строительства.

Расчет всех термодинамических параметров внутреннего воздуха производится путем последовательного решения уравнений (11)–(19), зная любые два из параметров можно определить остальные:

$$I = 1,005 \cdot t + (2500 + 1,8 \cdot t) \cdot d \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где I — энтальпия воздуха, кДж/кг; t — температура воздуха, °C; d — влагосодержание воздуха, г/кг.

$$d = d' \cdot 10^3 = 622 \cdot \frac{p_{\text{п}}}{(P_{\text{б}} - p_{\text{п}})}, \quad (12)$$

где d' — влагосодержание воздуха, кг/кг; $p_{\text{п}}$ — парциальное давление водяного пара в воздухе, Па; $P_{\text{б}}$ — барометрическое давление, Па (при отсутствии данный показатель принимается равным $P_{\text{б}} = 101\,325$ Па);

$$d = d' \cdot 10^3 = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{\text{н}}}{(P_{\text{б}} - \varphi \cdot p_{\text{н}})}, \quad (13)$$

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 \%, \quad (14)$$

где $p_{\text{н}}$ — парциальное давление насыщенного водяного пара (давление насыщения), Па; $p_{\text{п}}$ — парциальное давление водяного пара в воздухе, Па.

При температуре больше 0 °C:

$$p_{\text{н}} = 0,6112 \cdot e^{\frac{17,504 \cdot t}{241,2 + t}}. \quad (15)$$

При температуре от 0 °C и менее:

$$p_{\text{н}} = 0,6112 \cdot e^{\frac{22,489 \cdot t}{272,88 + t}}, \quad (16)$$

где p_n — парциальное давление насыщенного водяного пара или давление насыщения, Па; t — температура воздуха, °С.

$$\rho_v = \frac{353 - 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot p_n}{T}, \quad (17)$$

где p_n — парциальное давление водяного пара в воздухе, Па; T — температура воздуха, К;

$$c_{в.в.} = c_v + c_n \cdot d \cdot 10^{-3} = 1,8 + 1,005 \cdot d \cdot 10^{-3}, \quad (18)$$

где c_v — средняя удельная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·град); c_n — средняя удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·град); d — влагосодержание воздуха, г/кг.

Температура точки росы определяется по формуле:

$$t_p = \frac{\left[237,7 \cdot \left(\frac{17,27 \cdot t_v}{237 + t_v} + \ln \left(\frac{\varphi_v}{100} \right) \right) \right]}{\left[17,27 - \left(\frac{17,27 \cdot t_v}{237 + t_v} + \ln \left(\frac{\varphi_v}{100} \right) \right) \right]}, \quad (19)$$

где t_v — температура воздуха, °С; φ_v — относительная влажность воздуха, %.

Как отмечалось в работах [15–18], в существующих методиках, основывающихся на графоаналитическом построении процессов обработки воздуха на Id -диаграмме, расчет начинают с нанесения точек Н и Вл, параметры которых соответствуют параметрам наружного и внутреннего воздуха. Однако считается, что приток, подаваемый в направлении ледового поля сосредоточенными струями, охлаждается при постоянном влагосодержании. Исследования, приведенные в трудах [6, 14, 19], показывают, что это не соответствует действительности. В этой связи для учета влияния ассимиляции избытков влаги на процесс изменения параметров приточного воздуха в обслуживаемой зоне допустимо применять построение луча процесса с угловым коэффициентом, связывающим начальные и конечные значения параметров воздуха. Для этого необходимо определить тепловлагопоступления к внутреннему воздуху. Первая величина устанавливается по уравнению (2), для расчета второй составляющей в инженерной практике принято использовать аналогичную зависимость:

$$W_{я} = \beta(p_{пов} - p_v)F, \quad (20)$$

где β — коэффициент массоотдачи, кг/(ч·м²·Па); $p_{пов}$ — парциальное давление воздуха при температуре жидкости, Па; p_v — парциальное давление воздуха в обслуживаемой зоне, Па; F — площадь поверхности льда, м².

Соотношение (20) аналогично закону Ньютона – Рихмана, следовательно, процессы конвективного тепло- и массообмена описываются аналогичными дифференциальными уравнениями и, согласно тройной аналогии, можно определить количественную связь между коэффициентами тепло-

и массоотдачи. Поскольку концентрация воды в воздухе у ледового покрытия незначительно изменяется по нормали к межфазной поверхности, для рассматриваемой задачи представляется допустимым применить случай малой интенсивности массообмена, который характеризуется почти полным отсутствием влияния поперечного потока массы на течение смеси влажного воздуха. Подробно тройная аналогия для процессов тепломассообмена рассматривалась в работе [20], в которой отмечалось, что для рассматриваемой задачи вынужденной конвекции критериальные уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} Nu &= f(Re, Pr); \\ Nu_D &= f(Re, Pr_D), \end{aligned} \quad (21)$$

где Re , Pr и Pr_D — соответственно критерий Рейнольдса, критерий Прандтля и диффузионный критерий Прандтля.

Омывание поверхности ледового поля вентиляционным воздухом представляет собой частный случай омывания плоской пластины, для которого можно записать:

$$\overline{Nu} = 0,66 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (22)$$

где $\overline{Nu}$ — средний по характерному размеру критерий Нуссельта.

Для записи критериального уравнения массообмена необходимо тепловой критерий Прандтля заменить на диффузионный:

$$\overline{Nu}_D = 0,66 Re^{1/2} Pr_D^{1/3}, \quad (23)$$

В формулах (22) и (23) критерии подобия определяются следующим образом:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\beta l}{\rho D}; \quad \overline{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda}; \quad Re = \frac{w_v l}{\nu_v}, \quad (24)$$

где l — характерный размер (длина поверхности), м; D — коэффициент диффузии, м²/с; λ — коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·К); w_v — скорость газовой смеси, м/с; ν_v — кинематический коэффициент вязкости газовой смеси, м²/с.

В рассматриваемой задаче под газовой смесью понимается смесь воздуха с частицами водяного пара, где воздух считается газом постоянного состава. В этом случае коэффициент диффузии можно определить с помощью зависимости [20]:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,8} \cdot \frac{p_0}{p}, \quad (25)$$

где D_0 — коэффициент диффузии при условиях $T_0 = 273$ К, $p_0 = 0,101$ МПа ($D_0 = 0,216 \cdot 10^{-4}$ м²/с); T и p — соответственно температура и давление смеси для произвольных условий.

Таким образом, согласно работе [20], при обтекании плоской пластины воздушной смесью допустимо с достаточной точностью считать, что коэффи-

циенты тепло- и массообмена связаны между собой соотношением:

$$\beta = \frac{\alpha}{c_p}, \tag{26}$$

где c_p — теплоемкость влажного воздуха, Дж/(кг·К), если считать, что смесь влажного воздуха имеет постоянный состав, то ее теплоемкость можно определить по формуле:

$$c_p = \sum_{i=1}^n c_{pi} c_i = c_{p1} c_{вп} + c_{p2} c_{в}, \tag{27}$$

где $c_{вп}$ и $c_{в}$ — соответственно массовые концентрации водяного пара и воздуха, кДж/(кг·К).

Таким образом, зная величину коэффициента массообмена, можно найти объем влагопоступления к воздуху над поверхностью льда.

Поскольку для рассматриваемых объектов рекомендуется предусматривать рециркуляцию воздуха, что снижает энергетические затраты при его обработке [9, 16–18], большой интерес вызывает задача определения параметров воздуха после смешивания. В настоящий момент существует три способа организации воздухообмена зоны ледового поля по схемам «сверху–вверх», «сверху–вниз» и смешанной схеме, подробно они описаны в трудах [7, 9, 15–17].

Применительно к данной задаче нас интересует вопрос размещения воздухозаборных устройств для рециркуляции, которая может осуществляться как из верхней, так и из нижней зон, а также совместно. От этого зависят не только параметры смеси, но и дальнейшие расходы холода и теплоты на обработку приточного воздуха. Наиболее трудоемкими вычисления будут для смешанной схемы воздухо-

обмена, это связано с необходимостью определения соотношения объемов рециркуляционного воздуха, отбираемого совместно из верхней и нижней зон. При этом представляется целесообразным стремиться привести влагосодержание воздуха после второй ступени рециркуляции к значению, равному или максимально близкому к влагосодержанию приточного воздуха. В этом случае при равенстве названных параметров не требуется дополнительное осушение или увлажнение воздуха перед его подогревом в калорифере. Если добиться равенства влагосодержания проблематично, следует выбрать такое соотношение рециркуляционных расходов, при котором разница влагосодержания будет минимальной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для учета всех упомянутых факторов была разработана методика аналитического расчета параметров состояния воздуха при вентиляции и кондиционировании обслуживаемой зоны над ледовым полем, структурная блок-схема которой приведена на рис. 1.

На основании приведенной выше методики разработана программа расчета параметров состояния воздуха в зоне ледового поля. Реализация программной части выполнялась на высокоуровневом свободном объектно-ориентированном языке программирования Python. Данное приложение имеет модульную архитектуру, которая является сложной в плане разработки, но позволяет развивать программный продукт, добавляя новые функциональные возможности и корректируя уже реализованные, не изменяя архитектуры всего программного продукта, а затрагивая лишь его отдельные компоненты — независимые модули. Пример работы программы показан на рис. 2.

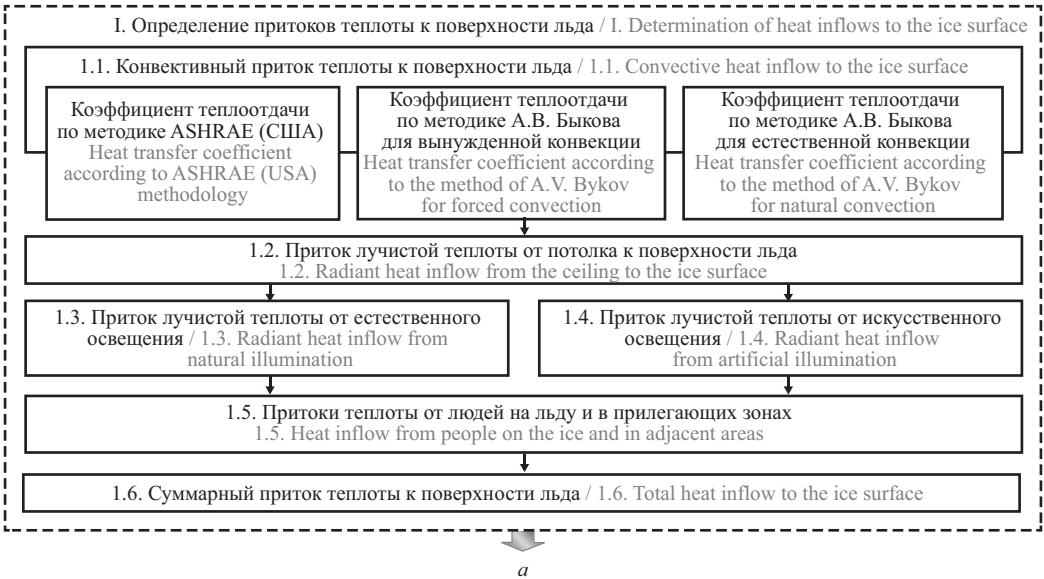


Рис. 1. Структурная блок-схема методики расчета параметров состояния воздуха: а — определение притоков теплоты к поверхности льда; б — определение параметров состояния воздуха; с — определение расходов теплоты и холода в центральном кондиционере

Fig. 1. Structural block diagram of the methodology for calculation of air condition parameters: а — determination of heat inflows to the ice surface; б — determination of air condition parameters; с — determination of heat and cold consumption in the central air conditioner

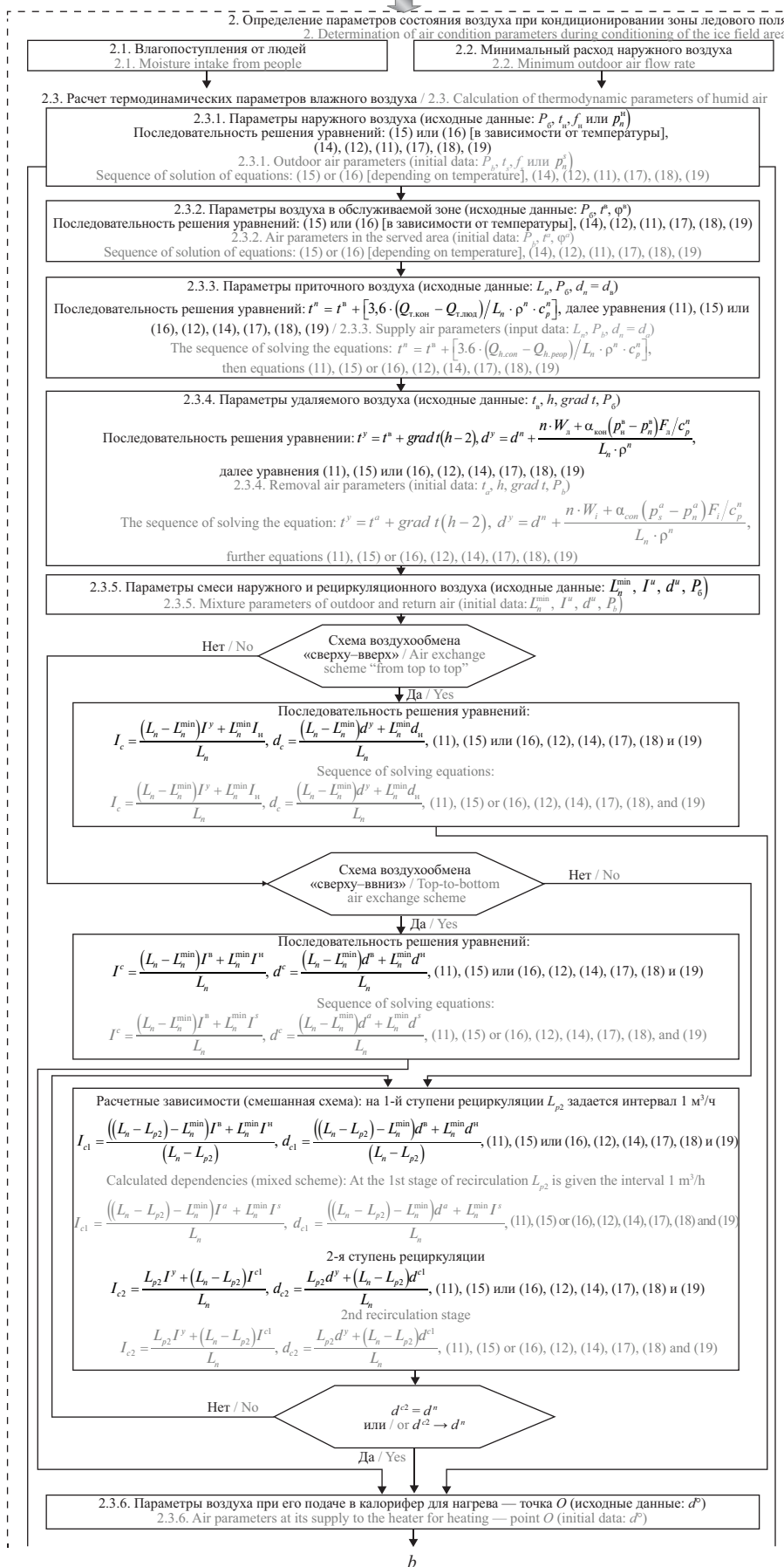


Рис. 1. Структурная блок-схема методики расчета параметров состояния воздуха: а — определение притоков теплоты к поверхности льда; б — определение параметров состояния воздуха; с — определение расходов теплоты и холода в центральном кондиционере (продолжение)

Fig. 1. Structural block diagram of the methodology for calculation of air condition parameters: а — determination of heat inflows to the ice surface; б — determination of air condition parameters; с — determination of heat and cold consumption in the central air conditioner (continuation)

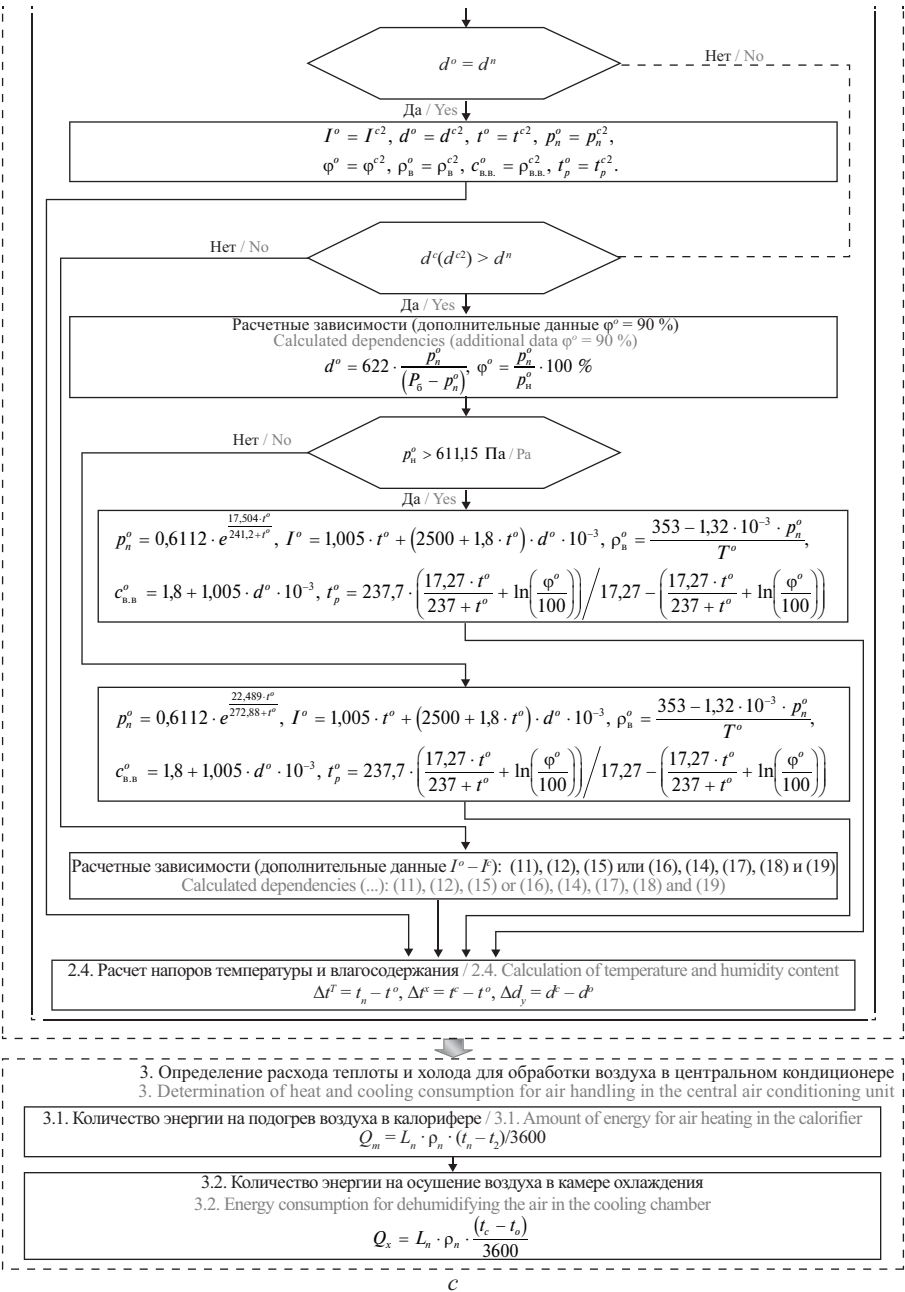


Рис. 1. Структурная блок-схема методики расчета параметров состояния воздуха: а — определение притоков теплоты к поверхности льда; б — определение параметров состояния воздуха; с — определение расходов теплоты и холода в центральном кондиционере (окончание)

Fig. 1. Structural block diagram of the methodology for calculation of air condition parameters: а — determination of heat inflows to the ice surface; б — determination of air condition parameters; с — determination of heat and cold consumption in the central air conditioner (ending)

Разработанная программа позволяет определять не только параметры состояния влажного воздуха при организации кондиционирования зоны ледового поля, но и рассчитывать затраты холода и теплоты на его обработку при различных схемах организации воздухообмена. Кроме того, для смешанной схемы осуществляется итерационный расчет оптимального соотношения объемов рециркуляционного воздуха, отбираемого из различных зон с отличающимися значениями температуры и влагосодержания.

Анализ приведенных на рис. 2, с результатов расчета показывает, что при воздухообмене в холодный

период года по смешанной схеме энергетические затраты на обработку приточного воздуха в центральном кондиционере значительно уменьшаются. Например, может не потребоваться дополнительное охлаждение подаваемого воздуха для его осушения, которого можно добиться путем выбора требуемого соотношения объемов рециркуляционного воздуха из верхней и рабочей зоны. Однако в теплый период года применение данной схемы может увеличивать затраты холода и теплоты по сравнению со схемой «сверху–вниз». По этой причине при круглогодичной эксплуатации помещений с искусственным льдом распределение

Расчет тепловых притоков к поверхности ледового поля

Температура воздуха в зоне ледового поля	10	°C	Поправочный коэфф. влияния вида остекления	0	-
Температура поверхности льда	-6	°C	Коэфф. поглощения слоя льда	0,5	-
Площадь ледового поля	1800	м2	Расход приточного воздуха	17000	м3/ч
Скорость воздуха у поверхности ледового поля	0,25	м/с	Количество спортсменов и судей	50	чел
Коэфф. теплопроводности воздуха	0,0251	Вт/(м·°C)	Удельные тепловыделения от людей	180	Вт/чел
Кинематический коэфф. вязкости воздуха (×10-6)	14,16	м2/с	Удельные влаговыведения от людей	170	г/(чел·ч)
Среднемесячная скорость ветра в расчетный период	0,25	м/с	Удельные расход наружного воздуха на человека	80	м3/(чел·ч)
Линейный размер поля в направлении движения ветра	30	м	Удельные тепловыделения от световых приборов	35,7	Вт/м2
Коэфф. влаговыведения	1	-	Излучение черного тела	5,67	Вт/(м2·К4)
Коэфф. отражения	0,6	-	Площадь светового проема	0	м2
Коэфф. облучения	0,5	-	Количество спортсменов и занимающихся	50	чел.

Рассчитать

a

Расчет параметров состояния воздуха в зоны ледового поля

Температура наружного воздуха	-7,5	°C
Парциальное давление пара в наружном воздухе	290	Па
Барометрическое давление	101325	Па
Относительная влажность воздуха в зоне ледового поля	46	%
Относительная влажность наружного воздуха	89	%
Градиент температуры выше обслуживаемой зоны	0,3	°C/м
Высота помещения	15	м

Рассчитать

b

Рис. 2. Пример работы программы: a — блок ввода исходных данных для теплового расчета; b — блок ввода исходных данных для расчета параметров состояния; c — блок вывода данных расчета

Fig. 2. Example of programme operation: a — input block of initial data for thermal calculation; b — input block of initial data for calculation of state parameters; c — calculation data output block

Вывод данных расчета														
Точки	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$d, \text{г/кг}$	$I, \text{Дж/кг}$	$\varphi, \%$	$t_p, ^\circ\text{C}$	$p_e, \text{кПа}$	$L'', \text{м}^3/\text{ч}$	$L^{p1}, \text{м}^3/\text{ч}$	$L^{p2}, \text{м}^3/\text{ч}$	$Q^{\text{кон}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{т}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{х}}, \text{Вт}$	$G, \text{кг/ч}$
Схема «сверху-вверх»														
Н	-7,5	1,32	1,78	-3,15	89	-8,7	0,29	2000	15000	–	92880	93790	63200	–
П	13,4	1,23	2,65	20,21	28	-4,2	0,430							
ВЛ	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У	9,5	1,25	3,10	17,4	42	-2,4	0,503							
С'	7,5	1,26	2,90	14,9	46	-2,9	0,480							
О	-2,9	1,30	2,65	3,59	90	-4,2	0,429							
Схема «сверху-вниз»														
Н	-7,5	1,32	1,78	-3,15	89	-8,7	0,29	2000	15000	–	92880	53400	–	2,04
П	13,4	1,23	2,65	20,21	28	-4,2	0,430							
ВЛ	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
С'	4,4	1,27	2,55	10,8	49	-4,7	0,410							
О	4,1	1,27	2,65	10,8	52	-4,2	0,43							
Смешанная схема														
Н	-7,5	1,32	1,78	-3,15	89	-8,7	0,29	2000	10500	4500	92880	46580	–	–
П	13,4	1,23	2,65	20,21	28	-4,2	0,430							
ВЛ	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У1	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У2	9,5	1,25	3,10	17,4	42	-2,4	0,503							
С'	3,8	1,27	2,51	10,15	50	-4,8	0,410							
С''	5,3	1,27	2,65	17,4	42	-4,1	0,430							
О	5,3	1,27	2,65	17,4	42	-4,1	0,430							

c

Рис. 2. Пример работы программы: а — блок ввода исходных данных для теплового расчета; б — блок ввода исходных данных для расчета параметров состояния; с — блок вывода данных расчета (окончание)

Fig. 2. Example of programme operation: a — input block of initial data for thermal calculation; b — input block of initial data for calculation of state parameters; c — calculation data output block (ending)

воздуха в теплый и холодный периоды года необходимо осуществлять по различным схемам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная аналитическая методика и программа расчета параметров состояния влажного воздуха дает возможность повысить точность расчета температуры, влагосодержания, парциального давления и энтальпии при проектировании систем вентиляции и кондиционирования помещений с искусственным льдом. Это способствует сокращению избыточных энергетических затрат при обработке

воздуха в центральном кондиционере. Отличительной особенностью предложенной методики является применение итерационного метода расчета при выборе оптимального соотношения расходов воздуха на первой и второй ступенях рециркуляции, что позволяет исключить при определенных условиях дополнительное охлаждение притока в холодный период года. Кроме того, использование тройной аналогии при рассмотрении конвективного тепло-массообмена внутреннего воздуха с поверхностью льда позволило повысить точность расчета влагопоступлений к удаляемому воздуху за счет введения поправки к влагосодержанию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Levy J.I., Lee K., Yanagisawa Y., Hutchinson P., Spengler J.D. Determinants of nitrogen dioxide concentrations in indoor ice skating rinks // American Public Health Association. 1998. Vol. 88. Issue 12. Pp. 1781–1786. DOI: 10.2105/ajph.88.12.1781
2. Yang C., Demokritou P., Chen Q., Spengler J. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas // ASHRAE Transactions. 2000. Vol. 106. Pp. 4405–4414.
3. Ivanov Y., Novikov N. Dual-channel digital control of energy consumption and air supply in micro-

climate systems of livestock premises // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. Issue 3. P. 032002. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032002
4. Русаков С.В. К расчету тепловых и влажностных нагрузок ледовых катков. Нагрузка от радиационного переноса теплоты // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. № 1. С. 10. EDN TOBGVX.

5. Khaled M., Ali S., Jaber H., Faraj J., Murr R., Lemenand T. Heating/cooling fresh air using hot/cold exhaust air of heating, ventilating, and air conditioning systems // *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 5. P. 1877. DOI: 10.3390/en15051877

6. Анисимов С.М., Денисихина Д.М., Полушкин В.И. Решение задачи турбулентного переноса импульса, тепла, примеси в объеме «чаши» ледовой арены // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 5 (34). С. 149–155. EDN PZVPRB.

7. Вишневский Е.П. Вентиляция и качество воздуха в крытых ледовых аренах // *СОК*. 2008. № 10. С. 34–39.

8. Денисихина Д.М. Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2015. № 5 (677). С. 38–48. EDN UBLRPF.

9. Кокорин О.Я. Инженерные системы помещений с искусственным льдом или снегом. М. : КУРС, 2022. 240 с.

10. Кокорин О.Я., Товарас Н.В. Снижение энергопотребления в системах кондиционирования воздуха для помещений с искусственными ледовыми полями // *Холодильная техника*. 2012. № 12. С. 12–15. EDN SEKLYR.

11. Дячек П.И., Ливанский Д.Г. Температурная неоднородность поверхности ледового поля крытых искусственных катков // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2010. № 2. С. 41–47.

12. Тарасова Е.В., Штым А.С. Изменение термодинамических параметров охлажденного воздуха при прямом контакте с естественным источником холода // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 6 (35). С. 107–112. EDN QZATVX.

13. Каутский А.А. Регулирование и контроль температуры льда искусственного катка // *Холодильная техника*. 1975. № 11. С. 51–52.

14. Пухкал В.А., Юстус Д.А. Воздухораспределение в помещениях ледовых площадок со зрителями // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 12 (39). С. 7–31. EDN VJPKGD.

15. Chuykin S.V., Glazkov S.S. Determination of the heat return coefficient of the ice surface for the mixed air distribution scheme // *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013. Vol. 3 (19). Pp. 29–38. EDN QLHSSJ.

16. Chuykin S.V. Problems of developing methods of designing microclimate systems for premises with artificial // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022. Vol. 4 (56). Pp. 18–28. DOI: 10.36622/VSTU.2022.56.4.002. EDN QJMDQJ.

17. Melkumov V.N., Chuykin S.V. A scheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas // *Journal of Technology*. 2017. Vol. 32. Issue 2. Pp. 139–146.

18. Melkumov V.N., Chuykin S.V. Organization of air distribution of covered multipurpose ice rinks // *Scientific herald of the Voronezh state university of architecture and civil engineering. Construction and architecture*. 2013. Vol. 3 (19). Pp. 17–28. EDN QLHSRZ.

19. Старкова Л.Г., Анисимова Е.Ю., Сорокина Н.Г., Дегтярь С.Л. Анализ схем вентиляции крытого катка с помощью числовой модели воздушных потоков // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. Т. 21. № 3. С. 42–50. DOI: 10.14529/build210306

20. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. М. : Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.

Поступила в редакцию 12 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 15 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 2 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Сергей Владимирович Чуйкин — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики; Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; SPIN-код: 4528-7170, Scopus: 57216439704, ResearcherID: R-3144-2016, ORCID: 0000-0001-6040-323X; ser.chu@mail.ru.

REFERENCES

1. Levy J.I., Lee K., Yanagisawa Y., Hutchinson P., Spengler J.D. Determinants of nitrogen dioxide concentrations in indoor ice skating rinks. *American Public Health Association*. 1998; 88(12):1781–1786. DOI: 10.2105/ajph.88.12.1781

2. Yang C., Demokritou P., Chen Q., Spengler J. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas. *ASHRAE Transactions*. 2000; 106:4405–4414.

3. Ivanov Y., Novikov N. Dual-channel digital control of energy consumption and air supply in microclimate systems of livestock premises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 937(3):032002. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032002

4. Rusakov S. To calculation of thermal and moist loadings ice skating rinks loading from radiant heat transfer. *Scientific Journal of St. Petersburg State University of Low*

Temperature and Food Technologies: Refrigeration and Air Conditioning. 2014; 1:10. EDN TOBGVX. (rus.).

5. Khaled M., Ali S., Jaber H., Faraj J., Murr R., Lemenand T. Heating/cooling fresh air using hot/cold exhaust air of heating, ventilating, and air conditioning systems. *Energies*. 2022; 15(5):1877. DOI: 10.3390/en15051877

6. Anisimov S.M., Denisikhina D.M., Polushkin V.I. The solution of the problem of turbulent transfer of momentum, heat and scalar in the volume of the ice arena "bowl". *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 5(34):149-155. EDN PZVPRB. (rus.).

7. Vishnevsky E.P. Ventilation and air quality in indoor ice arenas. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2008; 10:34-39. (rus.).

8. Denisikhina D.M. Research of different air distribution schemes in ice rink arena. *News of higher educational institutions. Construction*. 2015; 5(677):38-48. EDN UBLRPF. (rus.).

9. Kokorin O.Ya. *Engineering systems of rooms with artificial ice and snow*. Moscow, KURS Publ., 2022; 240. (rus.).

10. Kokorin O.Ya., Tovaras N.V. Reduction of energy consumption in air conditioning systems for rooms with artificial ice fields. *Refrigerating equipment*. 2012; 12:12-15. EDN SEKLYR. (rus.).

11. Diachek P.I., Livansky D.G. Temperature non-uniformity of ice-field surface at covered skating-rinks. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2010; 2:41-47. (rus.).

12. Tarasova E.V., Shtym A.S. Alteration of thermodynamic parameters of the cooled air in direct contact with a natural source of cold. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 6:107-112. EDN QZATVX. (rus.).

Received May 12, 2023.

Adopted in revised form on May 15, 2023.

Approved for publication on September 2, 2023.

B I O N O T E S : **Sergey V. Chuykin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh, 394006, Russian Federation; SPIN-code: 4528-7170, Scopus: 57216439704, ResearcherID: R-3144-2016, ORCID: 0000-0001-6040-323X; ser.chu@mail.ru.

13. Kautskij A.A. Regulation and control of the ice temperature of an artificial ice rink. *Refrigerating Equipment*. 1975; 11:51-52. (rus.).

14. Pukhal V.A., Yustus D.A. Air distribution in spectator ice arenas. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 12(39):7-31. EDN VJPKGD. (rus.).

15. Chuykin S.V., Glazkov S.S. Determination of the heat return coefficient of the ice surface for the mixed air distribution scheme. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013; 3(19):29-38. EDN QLHSSJ.

16. Chuykin S.V. Problems of developing methods of designing microclimate systems for premises with artificial. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022; 4(56):18-28. DOI: 10.36622/VSTU.2022.56.4.002. EDN QJMD0J.

17. Melkumov V.N., Chuykin S.V. A scheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas. *Journal of Technology*. 2017; 32(2):139-146.

18. Melkumov V.N., Chuykin S.V. Organization of air distribution of covered multipurpose ice rinks. *Scientific herald of the Voronezh state university of architecture and civil engineering. Construction and architecture*. 2013; 3(19):17-28. EDN QLHSRZ.

19. Starkova L.G., Anisimova E.Yu., Sorokina N.G., Deg-tiar S.L. Analysis of ventilation schemes for indoor ice skating rinks using a numerical air flow model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021. 21(3):42-50. DOI: 10.14529/build210306 (rus.).

20. Tsvetkov F.F. *Heat and mass exchange*. Moscow, Publishing House of MEI, 2005; 550. (rus.).

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.94:697.94

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1813-1820

Использование технологии дополненной реальности на этапах жизненного цикла объекта капитального строительства

Сергей Иванович Евтушенко, Максим Дмитриевич Куценко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проанализировано применение технологий информационного моделирования (BIM) и дополненной реальности (AR) на стадии строительства и последующей эксплуатации объектов капитального строительства.

Материалы и методы. Показаны потенциальные возможности оптимизации работы монтажных и строительных бригад или проведения экспертизы проекта с помощью BIM-технологий. Благодаря применению данной технологии: сокращаются сроки монтажных работ на объекте строительства (как следствие, снижаются затраты и повышается эффективность труда); сокращаются сроки выполнения экспертизы проекта (на этапе сдачи строительного объекта). Основная идея заключается в объединении технологии BIM на этапе строительства и технологии дополненной реальности. Совмещение этих технологий позволит облегчить выявление отступлений от проекта и снизит трудоемкость монтажных работ.

Результаты. Важное значение для практики строительства имеют предложенные информационные таблицы визуализации элементов информационной модели объекта строительства и ключевые принципы их наполнения данными на примере трубопровода на основании заданных точек построенной трехмерной модели. Рассмотрено применение AR на стадии эксплуатации на примере водомера и электрического счетчика.

Выводы. Сформулированы типы и определено содержание информационных таблиц визуализации магистрального трубопровода, на базе которых осуществляется построение трехмерной модели трубопровода на стадии строительства объекта. Приведен пример содержания информационной таблицы визуализации отдельных элементов информационной модели объекта строительства на стадии эксплуатации на примере водяного и электрического счетчика. Представлены направления дальнейших исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование, оптимизация работы монтажных бригад, технология дополненной реальности, жизненный цикл объекта капитального строительства, стадия строительства объекта, инженерные сети, информационные таблицы визуализации данных, снижение трудозатрат монтажных работ, очки дополненной реальности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Евтушенко С.И., Куценко М.Д. Использование технологии дополненной реальности на этапах жизненного цикла объекта капитального строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1813–1820. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1813-1820

Автор, ответственный за переписку: Сергей Иванович Евтушенко, evtushenkosi@mgsu.ru.

Use of augmented reality technology at the stages of the life cycle of a capital construction facility

Sergej I. Evtushenko, Maksim D. Kuzenko

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

ABSTRACT

Introduction. The application of information modelling (BIM) and augmented reality (AR) technologies at the stage of construction and subsequent operation of capital construction facilities (CCF) is analyzed.

Materials and methods. Potential possibilities of optimization of work of installation and construction teams or carrying out of project expertise using information modelling (BIM) technologies are shown. Due to the application of this technology: the terms of installation works at the construction site are reduced (as a result, costs are reduced and labour efficiency is increased); the terms of the project expertise are reduced (at the stage of construction object commissioning). The main idea is to combine BIM technology at the construction stage and augmented reality technology. Combination of these technologies will make it easier to identify deviations from the project and reduce the labour intensity of installation works.

Results. The proposed information tables for visualization of elements of the information model of the construction object and the key principles of their filling with data on the example of a pipeline on the basis of given points of the constructed three-dimensional model are of great importance for the construction practice. Examples of AR application at the operation stage on the example of a water meter and an electric meter are considered.

Conclusions. Types and content of information visualization tables of the main pipeline are formulated and determined on the basis of which the construction of a three-dimensional model of the pipeline at the construction stage of the facility is carried out. An example of the content of the information table of visualization of individual elements of the information model of the construction object at the operational stage is given on the example of a water and electric meter. The directions of further research are given.

KEYWORDS: information modelling, optimization of the work of installation teams, augmented reality technology, life cycle of the capital construction object, the construction stage of the facility, engineering networks, data visualization information tables, reduced labour costs of installation work, augmented reality glasses

FOR CITATION: Evtushenko S.I., Kuzenko M.D. Use of augmented reality technology at the stages of the life cycle of a capital construction facility. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1813-1820. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1813-1820 (rus.).

Corresponding author: Sergej I. Evtushenko, evtushenkosi@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Указу Президента РФ от 09.09.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» определены тенденции и динамика развития технологий дополненной (Augmented reality — AR) и виртуальной реальности (Virtual reality — VR) в России и в мире в целом [1]. В статье также даны основные понятия AR-технологии и рассмотрено ее влияние на современные компании в таких сферах деятельности, как экономика и менеджмент. Приведены примеры внедрения технологии AR и показаны потенциальные пути ее развития [1].

Анализ рынка в сфере технологии дополненной реальности выполнен авторами в работе [2]. Представлены динамика изменения объема инвестиций, тенденция роста продаж и их средний темп. Детально проанализирована география конкурирующих компаний и причины отсутствия интереса у потенциальных покупателей. Показаны предпочитаемые пользователями компании в сфере дополненной реальности [2].

В труде [3] рассмотрены потенциальные сферы применения дополненной и виртуальной реальности и вектор развития рынка технологий AR и VR. Введено понятие «цикл зрелости технологии». Авторы высказываются о недостатках и преимуществах технологий дополненной и виртуальной реальности. Освещено применение данных технологий российскими компаниями [3].

Проведено сравнение перспектив дополненной и виртуальной реальности в российских IT-компаниях и на мировом рынке, отмечены перспективные направления для отечественных компаний и конкурентные преимущества [4].

Исследовано применение направлений AR- и VR-технологий в таких областях, как строительство, транспорт, энергетическая промышленность, медицина, обучение [5]. Оценены вспомогательные устройства взаимодействия с дополненной и/или виртуальной реальностью [5].

Особенности использования дополненной реальности изучены рядом авторов [6–8]. Более подробно история развития технологии дополненной реальности и изменения в сфере потенциального применения технологии, а также тенденции технологии дополненной реальности рассмотрены в публикации [7]. Авторы рассмотрели применение технологии дополненной реальности в обучающем процессе на примере методологии обучения MARE и программного комплекса RealEye [8].

Проанализирована специфика обучения новым технологиям [9, 10]. В частности, выполнено сравнение очков дополненной реальности от различных компаний, их характеристик и стоимости, показаны перспективы применения AR в сфере обучения [9]. Примеры использования AR в проектировании и строительстве, программ дополненной реальности приведены в работе [10]. В строительстве современных зданий как жилого, так и производственного сектора применение дополненной и виртуальной реальности развивается достаточно успешно [11–15]. Продемонстрированы принцип построения виртуальных моделей местности и зданий и устройства создания VR в строительстве [11]. Рассмотрены минимизация затрачиваемого времени и повышение точности работ в строительстве при применении дополненной реальности, а также концепция конструкции специализированных устройств [12]. Изучение особенностей технологий дополненной и виртуальной реальности, их принципиальных отличий при применении в строительстве является актуальным.

Исследование выполнено на основе опыта по совершенствованию информационного моделирования [16–22] и проведенных на кафедре информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве НИУ МГСУ исследований AR- и VR-технологий [23–27]. Утвержденная стратегия¹

¹ Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года : Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р.

подтверждает важность дальнейшей работы в этом направлении.

При строительстве зданий значительную часть занимает монтаж различного технологического оборудования, а также инженерных сетей (водоснабжение, водоотведение, вентиляция и т.д.), которые обеспечивают функционирование зданий и сооружений. При осуществлении монтажа большая часть времени затрачивается на следующие работы: сверку рабочей документации и реалий, происходящих на объекте строительства; проработку месторасположения инженерных коммуникаций для предотвращения их пересечения (особенно при насыщенности инженерного оборудования и коммуникаций); выбор рациональных способов монтажа инженерных коммуникаций. Эти мероприятия замедляют работу

монтажной бригады, что ведет к повышению: трудоемкости выполняемых работ; увеличению сроков реализации проектов; возникновению ошибок (ввиду пересечения с другими коммуникациями или неправильным способом монтажа) и др. Совокупность указанных факторов влечет за собой снижение эффективности труда и экономической составляющей компании, осуществляющей монтажные работы. Аналогичная ситуация складывается при проведении экспертизы строительного объекта, которая состоит из сверки документации по объекту строительства с реалиями (оборудования, месторасположения, способа монтажа); выдачи предписания по выявленным замечаниям на объекте строительства на бумажном носителе, в котором перечислены пункты несоответствия с проектом и требуемый список исправлений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование BIM-технологий в сочетании с AR-технологией позволяет сократить временные затраты на анализ рабочей документации и проработку маршрута коммуникаций.

Суть предлагаемого метода состоит в применении технологии BIM при выполнении работ на объекте капитального строительства в пределах рабочего набора (workset) или среде общих данных об информационной модели (ИМ). Каждый элемент (кабельный лоток, вентиляционный канал, трубы и т.д.), созданный в проектной ИМ, имеет свои координаты $[X, Y, Z]$ относительно главных осей объекта. Сведения о пространственном расположении элементов предлагается использовать в информационных таблицах визуализации данных отдельных элементов ИМ объекта строительства. Визуализация осуществляется с помощью очков дополненной реальности, на которые предварительно загружаются необходимые рабочие наборы элементов ИМ. Координация очков происходит посредством встроенного в них приложения AR GPS-модуля и GPS-трекера, согласованного с главной осью объекта строительства.

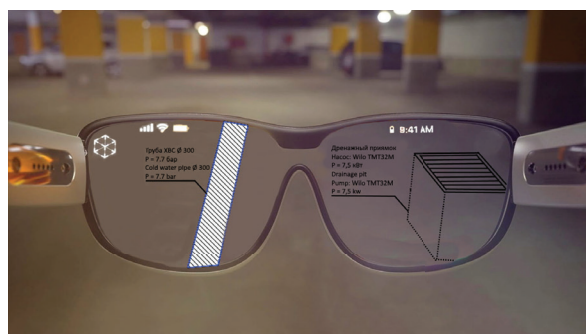
От главной оси объекта строительства проводится отсчет текущих координат элементов рабочего набора ИМ и текущих координат очков дополненной реальности в трехмерной системе координат $[X, Y, Z]$.

На рис. 1 продемонстрированы примеры использования подобной технологии на объекте строительства.

Кроме визуализации месторасположения оборудования и инженерных коммуникаций, в информационные таблицы визуализации также добавляется инструкция по монтажу, согласно действующим требованиям нормативно-технической документации. Информация по способу монтажа оборудования и коммуникаций может быть представлена как в тек-



a



b

Рис. 1. Визуализации технологии BIM и технологии дополненной реальности на строительном объекте: *a* — пример 1; 1 — установка пожаротушения; 2 — общеобменная вентиляция; *b* — пример 2 (представлено: магистраль водоснабжения ХВС, дренажный приямок)

Fig. 1. Visualization of BIM technology and augmented reality technology at a construction site: *a* — example 1; 1 — fire extinguishing installation; 2 — general ventilation; *b* — example 2 (presented by: water supply main CWS, drainage pit)

стовом, так и в визуальном варианте в виде образов отдельных элементов ИМ объекта строительства.

Технология применима и в рамках экспертизы строительного объекта, в ходе которой экспертная комиссия сверяется с проектными данными на соответствие: оборудования (тип, мощность, количество, производитель и т.д); месторасположения коммуникаций; правильности монтажа и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предложены информационные таблицы визуализации двух элементов ИМ объекта строительства и основные принципы их наполнения данными. Рассмотрим одну из них подробнее в таблице.

Согласно таблице выполняется визуализация магистрального трубопровода по заданным точкам, как показано на рис. 2.

На основании заданных точек осуществляется построение трехмерной модели на изучаемом строительном объекте.

Рассмотрим другие примеры применения дополненной реальности на стадии эксплуатации. В настоящее время достаточно хорошо налажен учет потребления воды в квартирах и частных домовладениях. Важными и неизменными параметрами служат номер лицевого счета и заводской номер водомера. Переменные параметры — дата последней поверки и дата ее окончания. Часто изменяемыми являются текущее и последнее показания, переданные в учетную организацию. Для старого жилого фонда Москвы характерно то, что в квартире установлено два счетчика для учета горячей и холодной воды. В современных квартирах делают два санузла и счетчиков устанавливают четыре. В квитанциях по оплате ЖКУ в г. Москве запланирована

Информационная таблица для визуализации магистрального трубопровода

Information table for visualization of the main pipeline

Номер информационной точки Data point number	Положение по оси X, м X-axis position, m	Положение по оси Y, м Y-axis position, m	Положение по оси Z, м Z-axis position, m	Диаметр трубы, мм Pipe diameter, mm
1-й этаж / 1st floor				
1	50	-5	17	300
2	50	10	17	300
3	120	10	17	300
4	170	5	17	300
5	190	5	17	300
6	200	10	17	300
7	220	10	17	300

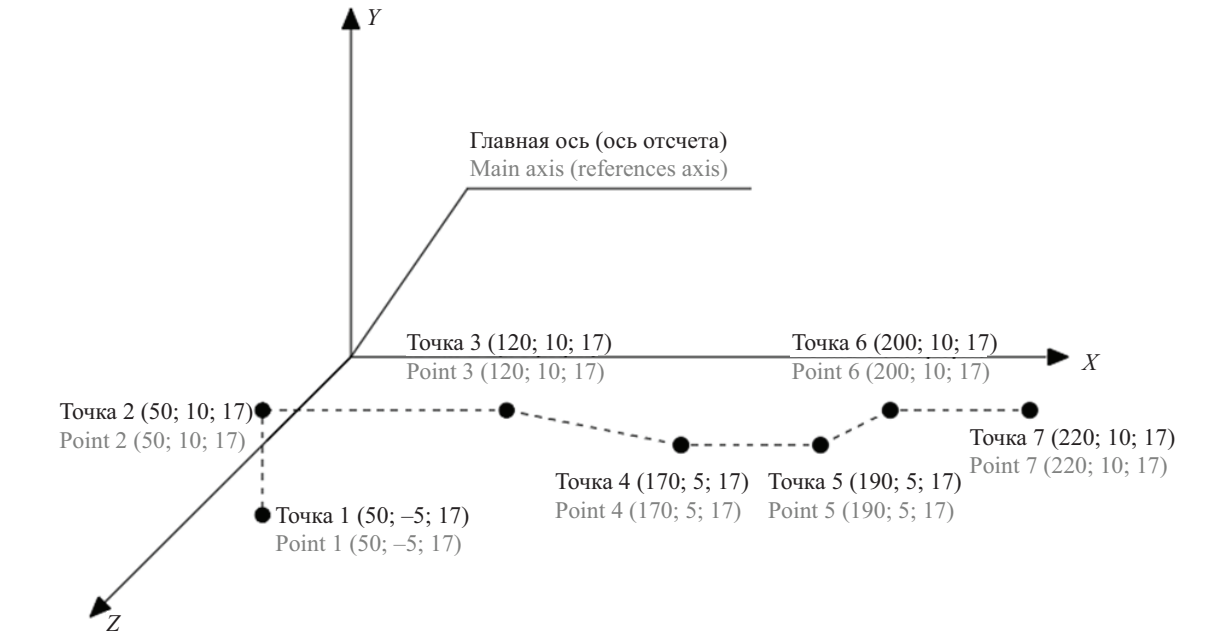


Рис. 2. График (XYZ) координации магистрального трубопровода

Fig. 2. Graph (XYZ) of the coordination of the main pipeline

возможность давать показания четырех счетчиков горячей и четырех счетчиков холодной воды. Таким образом, в таблице для обозначения датчиков авторы предлагают целочисленное число, состоящее из двух цифр. Первая цифра тип счетчика: 1 — холодная вода; 2 — горячая вода; 3 — счетчик для полива огорода и т.д. У счетчика типа 3 для измерения количества воды, использованной для полива, есть особенность, состоящая в том, что его показания вычитаются из показания счетчика входящей воды. Это необходимо, чтобы определить объем сточных вод для начисления оплаты за очистку воды. В таблице следует указать еще два признака: счетчик электронный или механический (0/1) и умный счетчик (1), снабженный модулем для автоматической передачи показаний (например, Bluetooth) или старого образца (0).

Для учета потребления электроэнергии используются электросчетчики, которые также имеют неизменные параметры, такие как номер лицевого счета и заводской номер счетчика. Переменные параметры — дата последней поверки и дата ее окончания. Часто изменяемые — текущее и последнее показания, переданные в учетную организацию. Счетчики энергии позволяют получить расход в ночное время T1, в часы пиковой нагрузки T2 и в обычное время (полупик) T3, а также суммарное

значение потребленной электроэнергии. В таблице требуется указать еще два целочисленных признака: счетчик трехфазный или двухфазный (0/1) и умный счетчик (1), снабженный модулем для автоматической передачи показаний (например, Bluetooth) или старого образца (0).

На первом главном экране для каждого элемента объекта капитального строительства должно быть не более 7 или 9 параметров. На следующих экранах информационной таблицы размещается дополнительная информация о текущих ремонтах оборудования, паспорт прибора с гарантийными условиями, инструкцией об установке и прочие сведения. На отдельных экранах информационных таблиц представлена другая информация, размещаемая эксплуатирующей организацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сформулированы типы информационных таблиц визуализации отдельных элементов информационной модели объекта строительства. Приведен пример содержания информационной таблицы для визуализации магистрального трубопровода, на основании которой осуществляется построение трехмерной модели трубопровода. Представлены направления дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Соснило А.И., Устюжанина М.Д.* Технологии виртуальной и дополненной реальности как факторы государственной экономической политики и роста конкурентоспособности бизнеса // *Вестник ПГИПУ. Социально-экономические науки.* 2019. № 2. С. 204–219. DOI: 10.15593/2224-9354/2019.2.15. EDN VNPEVC.

2. *Изосина Е.В., Семеркова Л.Н.* Оценка стратегической привлекательности рынка виртуальной и дополненной реальности в России // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки.* 2017. № 3 (43). С. 193–202. DOI: 10.21685/2072-3016-2017-3-21. EDN YTMWEZ.

3. *Иванова А.В.* Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения // *Стратегические решения и риск-менеджмент.* 2018. № 3. С. 88–107. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-3-88-107

4. *Кучмиева Д.А.* Перспективы российских IT-компаний на мировом рынке VR и AR технологий // *Вестник науки и образования.* 2019. № 12–1 (66). С. 73–76. EDN JAXWWM.

5. *Кузнецов В.А., Руссу Ю.Г., Куприяновский В.П.* Об использовании виртуальной и дополненной реальности // *International Journal of Open*

Information Technologies. 2019. Т. 7. № 4. С. 75–84. EDN YOFXAO.

6. *Яковлев Б.С., Пустов С.И.* Классификация и перспективные направления использования технологии дополненной реальности // *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2013. № 3. С. 484–492. EDN QCGFJL.

7. *Яковлев Б.С., Пустов С.И.* История, особенности и перспективы технологии дополненной реальности // *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2013. № 3. С. 479–484. EDN MWPJML.

8. *Филимоненкова Т.Н.* Дополненная реальность как инновационная технология образовательного процесса // *Проблемы современного педагогического образования.* 2018. № 58–1. С. 246–251.

9. *Шевченко Г.И., Кочкин Д.А.* Основные характеристики очков виртуальной реальности и перспективы их использования в учебном процессе // *Преподаватель XXI век.* 2018. № 4–1. С. 160–168.

10. *Кравченко Ю.А., Лежебоков А.А., Пащенко С.В.* Особенности использования технологии дополненной реальности для поддержки образовательных процессов // *Открытое образование.* 2014. № 3 (104). С. 49–54. DOI: 10.21686/1818-4243-2014-3-104-49-54

11. Колесников А.А., Кикин П.М., Комиссарова Е.В. Создание виртуальных моделей местности и зданий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 7. С. 45–49. EDN VVZYSZ.
12. Кузнецов Е.Ю., Новикова Е.А. Дополненная реальность как новый уровень качества работ в строительной сфере // Синергия наук. 2019. № 31. С. 608–614. EDN YWDECD.
13. Князева Л.Л., Федоров О.П. Дополненная реальность как средство коммуникации в архитектурном проектировании // Синергия наук. 2019. № 31. С. 764–774. EDN YWDEGL.
14. Обвинцева Е.О., Рязанов И.Ю., Шавва А.А. Дополненная реальность в проектировании и строительстве // Синергия наук. 2019. № 31. С. 638–644.
15. Симченко О.Л., Сунцов А.С., Чазов Е.Л., Куделина А.А., Малышева Е.Н. Проблемы и перспективы применения технологий виртуальной и дополненной реальности в строительстве // Фундаментальная и прикладная наука: Состояние и тенденция развития : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 91–98. EDN FMTULT.
16. Shilov L., Evtushenko S., Arkhipov D., Shilova L. The prospects of information technology using for the analysis of industrial buildings defects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012039
17. Евтушенко С.И., Шилова Л.А., Улесикова Е.С., Кучумов М.А. Информационное моделирование тоннеля метро с противовибрационными мероприятиями // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 10 (100). С. 29–35. EDN KAKHFS.
18. Шутова М.Н., Вареница А.П., Евтушенко С.И., Подскребалин А.С. Применение метода 3D сканирования при выполнении обмерных работ объектов производственного и непроизводственного назначения // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10. № 2. С. 76–80. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-76-80. EDN NYAEVM.
19. Евтушенко С.И., Пученков И.С. Создание информационной модели здания в среде общих данных // Строительство и архитектура. 2021. Т. 9. № 1. С. 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-1-46-50. EDN PBMPSCM.
20. Феттер М.А., Евтушенко С.И. Проблемы применения автоматической расстановки элементов при построении информационной модели трубопроводных систем здания по облакам точек // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10. № 2. С. 71–75. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-71-75. EDN NVEZMF.
21. Остафьев Р.В., Евтушенко С.И. Разработка IFC маппинга для выгрузки информационных моделей архитектурных решений // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10. № 2. С. 91–110. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-91-110. EDN YADGFT.
22. Остафьев Р.В., Евтушенко С.И. Анализ плагина для связи информационных моделей зданий Direct Link // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений : мат. XIX Междунар. науч.-техн. конф. 2020. С. 9–13. EDN NLOBBJ.
23. Шабалин М.С., Назаров Е.С., Якубович А.М., Лосев К.Ю. Возможности использования AR и VR в процессе жизненного цикла здания в России // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019 : сб. мат. Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 563–566. EDN BJIVZG.
24. Лужнев А.Ю. Лазерное сканирование для BIM и результаты визуализации в среде VR // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. 2020. С. 499–503. EDN IPDEBH.
25. Шабалин М.С., Баширова Ю.Р. Сравнительный анализ программ, использующих AR технологию применительно к объектам строительства и архитектуры // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. 2020. С. 441–444. EDN JDSPCS.
26. Синягина К.А. Применение AR-технологии в индивидуальном строительстве // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. 2022. С. 219–224. EDN JYMQLO.
27. Железнова А.О. Реализация VR-технологий на основе возможностей AutoDesk Revit и A360 Rendering // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. 2022. С. 246–249. EDN FILXSK.

Поступила в редакцию 6 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Иванович Евтушенко — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем, технологии и автоматизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; evtushenkosi@mgsu.ru;

Максим Дмитриевич Куценко — магистрант кафедры информационных систем, технологии и автоматизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; maks_kutsenko_mk@mail.ru.

Вклад авторов:

Евтушенко С.И. — научное руководство, написание и редактирование текста, развитие методики, дополнение и редактирование итоговых выводов.

Куценко М.Д. — идея, сбор материала, написание итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sosnilo A.I., Ustyuzhanina M.D. Technology of virtual and augmented reality as factors of state economic policy and business competitiveness growth. *PNRPU Sociology and Economics Bulletin*. 2019; 2:204-219. DOI: 10.15593/2224-9354/2019.2.15. EDN VNPEVC. (rus.).
2. Izosina E.V., Semerkova L.N. Strategic appeal evaluation of the virtual and augmented reality market in Russia. *University proceedings. Volga region. Social sciences*. 2017; 3(43):193-202. DOI: 10.21685/2072-3016-2017-3-21. EDN YTMWEZ. (rus.).
3. Ivanova A.V. VR & AR technologies: opportunities and application obstacles. *Strategic decisions and risk management*. 2018; 3:88-107. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-3-88-107 (rus.).
4. Kuchmieva D.A. Prospects of Russian IT companies in the world market of VR and AR technologies. *Herald of Science and Education*. 2019; 12-1(66):73-76. EDN JAXWWM. (rus.).
5. Kuznetsov V., Russu Ju., Kupriyanovsky V. On the use of virtual and augmented reality. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019; 7(4):75-84. EDN YOFXAO. (rus.).
6. Yakovlev B.S., Pustov S.I. Classification and promising application augmented reality. *Izvestiya Tula State University*. 2013; 3:484-492. EDN QCGFJL. (rus.).
7. Yakovlev B.S., Pustov S.I. History, features and prospects of augmented reality. *Izvestiya Tula State University*. 2013; 3:479-484. EDN MWPJML. (rus.).
8. Filimonenkova T.N. Augmented reality as an innovative technology of the educational process. *Problems of Modern Pedagogical Education*. 2018; 58-1:246-251. (rus.).
9. Shevchenko G.I., Kochin D.A. The main characteristics of VR glasses and the prospects of their use in the educational process. *Teacher of the XXI century*. 2018; 4-1:160-168. (rus.).
10. Kravchenko Yu.A., Lezhebokov A.A., Pashenko S.V. Features of using augmented reality technology to support educational processes. *Open Education*. 2014; 3(104):49-54. DOI: 10.21686/1818-4243-2014-3(104-49-54) (rus.).
11. Kolesnikov A.A., Kikin P.M., Komissarova E.V. Creation of a virtual models of terrain and buildings. *Interexpo Geo-Siberia*. 2016; 7:45-49. EDN VVZYSZ. (rus.).
12. Kuznechenkov E.Yu. AR as a new level of quality of work in the construction sector. *Synergy Journal*. 2019; 31:608-614. EDN YWDECD. (rus.).
13. Knyazeva L.L., Fedorov O.P. AR as a means of communication in architectural design. *Synergy Journal*. 2019; 31:764-774. EDN YWDEGL. (rus.).
14. Obvinceva E.O., Ryazanov I.Yu., Shavva A.A. AR in design and construction. *Synergy Journal*. 2019; 31:638-644. (rus.).
15. Simchenko O.L., Suncov A.S., Chazov E.A., Kudelina A.A., Malysheva E.N. Problems and prospects of using VR and AR technologies in construction. *Fundamental and applied science: The state and trend of development : collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference*. 2020; 91-98. EDN FMTULT. (rus.).
16. Shilov L., Evtushenko S., Arkhipov D., Shilova L. The prospects of information technology using for the analysis of industrial buildings defects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012039. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012039
17. Evtushenko S.I., Shilova L.A., Ulesikova E.S., Kuchumov M.A. Information modeling of a subway tunnel with anti-vibration measures. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 10(100):29-35. EDN KAKHFS. (rus.).
18. Shutova M., Varenitsa A., Evtushenko S., Podskrebalin A. Application of the 3D scanning method when performing measurement works of industrial and non-industrial objects. *Construction and Architecture*. 2022; 10(2):76-80. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-76-80. EDN NYAEVM. (rus.).
19. Evtushenko S., Puchenkov I. Creating a building information model in a shared data environment. *Construction and Architecture*. 2021; 9(1):46-50. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-1-46-50. EDN PBMPM. (rus.).
20. Fetter M., Evtushenko S. Problems of application of automatic arrangement of elements in the construction of an information model of pipeline systems of a building based on point clouds. *Construction and Architecture*. 2022; 10(2):71-75. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-71-75. EDN NVEZMF. (rus.).
21. Ostashev R., Evtushenko S. Development of IFC mapping for export of information models of architectural solutions. *Construction and Architecture*. 2022; 10(2):91-110. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-2-91-110. EDN YADGFT. (rus.).
22. Ostashev R.V., Evtushenko S.I. Analysis of the plugin for communication of building information

models direct link. *Information technologies in the survey of operated buildings and structures : materials of the XIX International Scientific and Technical conf.* 2020; 9-13. EDN NLOBBJ. (rus.).

23. Shabalin M.S., Nazarov E.S., Yakubovich A.M., Losev K.Yu. The possibilities of using AR and VR in the life cycle of a building in Russia. *System engineering of construction. Cyberphysical building systems – 2019 : collection of materials of the All-Russian Scientific Conference 2019*; 563-566. EDN BJIVZG. (rus.).

24. Lujev A.Yu. Laser scanning for BIM and visualization results in a VR environment. *Student Science Days : collection of reports of the scientific and technical conference.* 2020; 499-503. EDN IPDEBH. (rus.).

25. Shabalin M.S., Bashirova Yu.R. Comparative analysis of programs using AR technology in relation to construction and architecture objects. *Student Science Days : collection of reports of the scientific and technical conference.* 2020; 441-444. EDN JDSPCS. (rus.).

26. Sinyagina K.A., Rybakova A.O. Application of AR technology in individual construction. *Student Science Days : collection of reports of the scientific and technical conference.* 2022; 219-224. EDN JYMQLO. (rus.).

27. Jeleznova A.O. Implementation of VR technologies based on the capabilities of AutoDesk Revit and A360 Rendering. *Student Science Days : collection of reports of the scientific and technical conference.* 2022; 246-249. EDN FILXSK. (rus.).

Received February 6, 2023.

Adopted in revised form on February 28, 2023.

Approved for publication on September 18, 2023.

B I O N O T E S : **Sergej I. Evtushenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems, Technology and Automation of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; evtushenkosi@mgsu.ru;

Maksim D. Kuzenko — master's student of the Department of Information Systems, Technology and Automation of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; maks_kutsenko_mk@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergej I. Evtushenko — scientific guidance, writing the review text, writing and editing the text, developing the methodology, supplementing and editing the final conclusions.

Maksim D. Kuzenko — the idea, collecting material for the review, writing the final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1821-1835

Распределение транзакционных издержек в инвестиционно-строительной сфере Российской Федерации

Роман Русланович Козаков¹, Вадим Аркадьевич Кошечев²

¹ Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Транзакционные издержки в инвестиционно-строительной сфере (ИСС) с 2008 г. все чаще становятся объектом международного исследовательского интереса. В качестве одной из причин этого является их влияние на производительность труда, рост которой преследуют и государственные, и коммерческие структуры. Актуальность их анализа связана с существенной долей транзакционного сектора в валовом внутреннем продукте (ВВП) национального хозяйства, изменение которой может быть сопряжено как с эффективностью, так и неэффективностью выстроенной институциональной среды. Цель исследования — разработка рекомендаций по воздействию на элементы институциональной среды для снижения административных барьеров, характерных для ИСС РФ. Новизна авторского подхода формируется за счет рассмотрения аспекта распределения транзакционных издержек под воздействием разнородных контрактов между участниками ИСС РФ.

Материалы и методы. Использованы данные Росстата о структуре ВВП РФ, проанализированы результаты международных исследований по количественной и качественной оценке транзакционных издержек в строительстве. Исследование опиралось на инструментарий институциональных теорий (транзакционных издержек, институциональных изменений, институциональных ловушек, синергетическое развитие организаций и др.), а также общенаучные методы.

Результаты. Детализировано понятие постконтрактной стадии, с которой международные исследователи связывали некоторый набор транзакционных издержек. Детализация обоснована неопределенностью окончания стадии контракта с позиций институциональной теории (контрактных отношений), а также наличием отношенческих соглашений между участниками инвестиционно-строительных проектов и на стадии эксплуатации. Выявлены распределители транзакционных издержек в ИСС РФ: предсказуемость заказчика, институциональная рента подрядчика, институциональная рента застройщика, полнота отношенческих контрактов обеспечения предсказуемости заказчика, информация о доходности обхода формальных правил субъектами ИСС, цифровизация.

Выводы. Описание транзакционных издержек через аспект их распределения позволяет формализовать модель их количественного или качественного измерения, учитывая воздействие институциональной среды в РФ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транзакционные издержки, институциональная среда, строительная сфера, контрактные отношения, институциональные ловушки, взаимодействие экономических агентов, корпоративный контроль

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Козаков Р.Р., Кошечев В.А. Распределение транзакционных издержек в инвестиционно-строительной сфере Российской Федерации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1821–1835. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1821-1835

Автор, ответственный за переписку: Роман Русланович Козаков, kozakov-2001@list.ru.

Distribution of transaction costs in the investment and construction sector of the Russian Federation

Roman R. Kozakov¹, Vadim A. Koshcheev²

¹ St. Petersburg State University of Economics (SPbSUE); St. Petersburg, Russian Federation;

² St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the analysis of transaction costs is associated with a significant share of the transaction sector in the gross domestic product (GDP) of the national economy, a change in which can be associated with both the efficiency and inefficiency of the built institutional environment. The purpose of the study is to develop recommendations for influencing the elements of the institutional environment to optimize administrative barriers typical for the investment and construction sector (ICS) of the Russian Federation. The novelty of the author's approach is formed by considering the aspect of distribution of transaction costs under the influence of heterogeneous contracts between the participants of the ICS.

Materials and methods. The data of Rosstat on the structure of the gross domestic product of the Russian Federation are used, the results of international studies on quantitative and qualitative assessment of transaction costs in construction are analyzed. The study was based on the tools of institutional theories, as well as general scientific methods.

Results. Distributors of transaction costs in the investment and construction sector of the Russian Federation are revealed: customer predictability, institutional rent of the contractor, institutional rent of the developer, completeness of relational contracts to ensure customer predictability, information on the profitability of bypassing formal rules by subjects of the investment and construction sector, digitalization.

Conclusions. The description of transaction costs through the aspect of their distribution allows to formalize a model of their quantitative or qualitative measurement, taking into account the impact of the institutional environment in the Russian Federation.

KEYWORDS: transaction costs, institutional environment, construction sector, contractual relations, institutional traps, interaction of economic agents, corporate control

FOR CITATION: Kozakov R.R., Koshcheev V.A. Distribution of transaction costs in the investment and construction sector of the Russian Federation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1821-1835. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1821-1835 (rus.).

Corresponding author: Roman R. Kozakov, kozakov-2001@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Российская экономика на протяжении последних лет имеет хоть и стабильный, но относительно низкий темп роста, при этом существующие международные институциональные преобразования в очередной раз напомнили, что необходима его интенсификация. ВВП РФ, выступая в качестве общепризнанного показателя экономического роста, соответствуя международным трендам, имеет значительную долю транзакционного сектора. В качестве способа распределения экономики на транзакционные и базовые сектора авторами исследования принята методика, предложенная О.С. Сухаревым [1, с. 23], согласно которой в первый входят следующие сферы деятельности: G, H, I, J, K, L, M, N, O-84, P-85, Q, R, S¹. Им же предложена модель оценки вклада каждой сферы деятельности в экономический рост, выраженный в виде произведения темпов

роста на удельный вес в ВВП каждой из них. В результате чего имеется возможность оценить удельный вес валовой добавленной стоимости (ВДС или GVA) секторов в ВВП РФ, отметить их темпы роста в период с 2011–2022 гг., оценить вклад в экономический рост (рис. 1–3 соответственно).

В целом объем транзакционного сектора в РФ еще 10 лет назад отмечался отечественными исследователями на уровне, чуть превышающем 50–60 % [2–14]. Как видно из рис. 1, ситуация кардинально не изменилась, причем его удельный вес в 2022 г. практически повторил показатель за 2012 г. рис. 2 демонстрирует изменение темпов роста секторов в рассматриваемый период, где отчетливо выделяется влияние событий 2020 г. на структуру НДС. Как видно из рис. 3, базовый сектор, хоть и уступает транзакционному, но все же имеет существенный вклад в экономический рост РФ, отдельно стоит выделить строительство (рис. 4).

Как можно увидеть на рис. 4, строительство наращивает вклад в экономический рост РФ, строительный бум, начавшийся ориентировочно в 2019 г.,

¹ Наименования разделов соответствуют ОКВЭД от Росстата // Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13221>

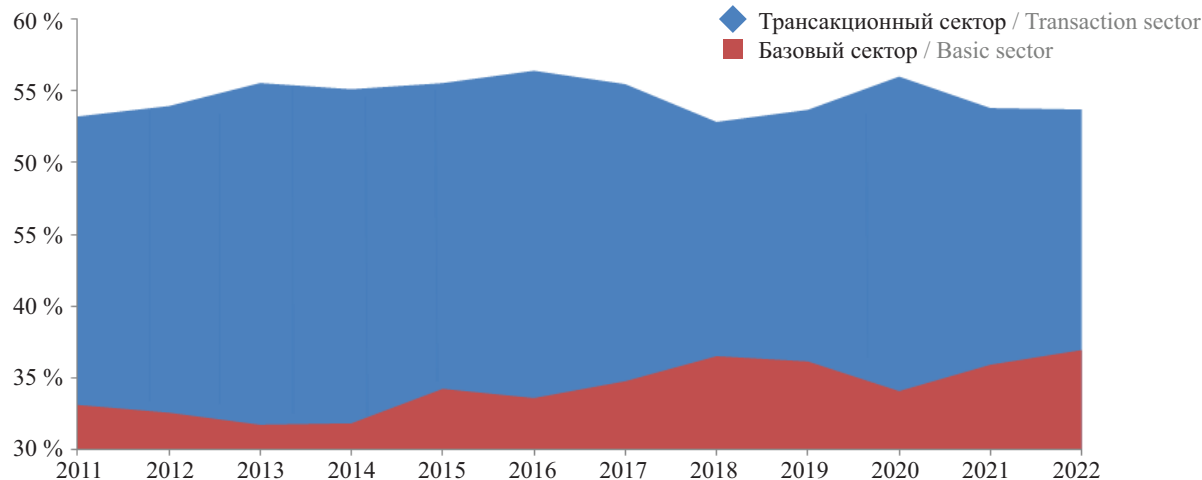


Рис. 1. Удельный вес НДС секторов в ВВП РФ в период 2011–2022 гг. (составлено авторами на основании системы национальных счетов (СНС) от Росстата)

Fig. 1. Share of GVA of sectors in the GDP of the Russian Federation in the period 2011–2022 (compiled by the authors based on the System of National Accounts (SNA) from Rosstat)

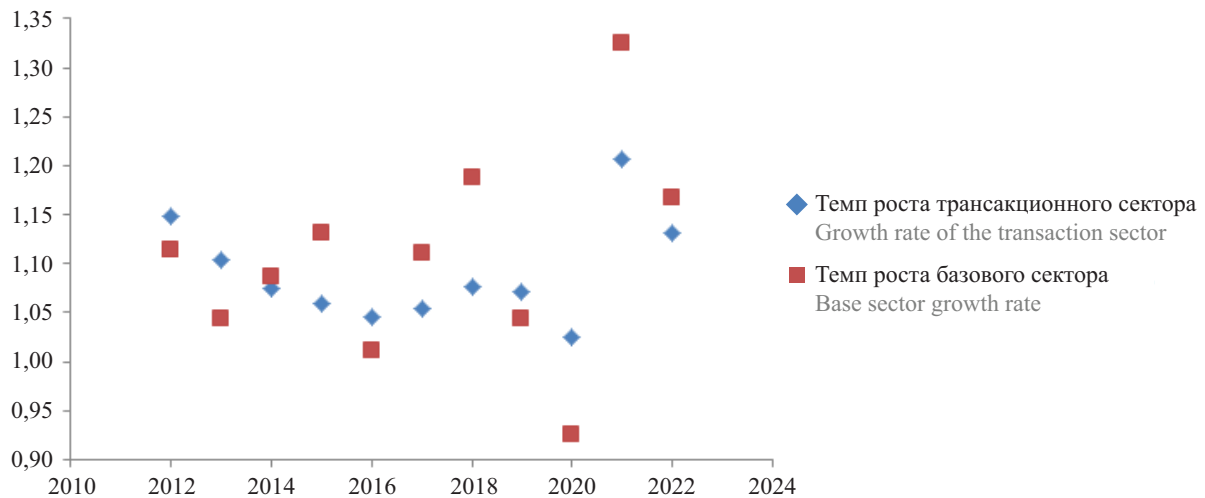


Рис. 2. ВДС транзакционного и базового сектора российской экономики в период 2011–2022 гг.: коэффициенты роста (составлено авторами на основании СНС от Росстата)

Fig. 2. GVA of the transaction and basic sectors of the Russian economy in the period 2011–2022: growth rates (compiled by the authors on the basis of the SNA from Rosstat)

чуть скорректировал темпы в 2020 г. из-за наложения ограничений на миграционные потоки и локдаунов, однако в 2021 г. восстановил темпы деловой активности. Причем мультипликативный эффект от инвестиций в строительство для российской экономики находится на достаточно высоком уровне², чтобы обозначить данную сферу драйвером роста³.

В качестве инструмента повышения производительности труда (требуемой для экономического роста) в строительстве (как и в других сферах деятельности) выступит оптимизация транзакционных издержек. Транзакционные издержки в строительстве рассматривались отечественными и зарубежными исследователями с различных сторон. В иностранных источниках (фундаментальные из них представлены на рис. 5), исходя из институциональных особенностей и различий (с отечественными) в обеспечении научной деятельности (в первую очередь — обеспеченностью базами данных), рассматривался аспект формализации, точнее выявления корреляционных и регрессионных связей между детерминантами транзакционных издержек в строительстве.

Рис. 5 иллюстрирует, как в период 1937–2021 гг. менялся аспект транзакционных издержек, т.е. что именно интересовало научное общество. Можно

заметить, что особую роль иностранные ученые транзакционным издержкам в строительстве стали уделять по большей мере с 2013 г., до этого затрагивались градостроительная политика и государственные закупки, т.е. смещение произошло от публичного сектора в сторону предпринимателей. Аспекты транзакционных издержек в 2020 г., как можно предположить, инициированы развитием цифровизации инвестиционно-строительной сферы (ИСС), за счет которой процессы закупок и цепочки поставок имеется возможность оптимизировать (из-за как раз сокращения транзакционных издержек).

В отечественных источниках рассматривался аспект институциональной инфраструктуры, детерминирующей структуру транзакционных издержек в строительстве, что также было связано с актуальной (и сегодня) проблемой административных барьеров (в строительной сфере РФ). Причем интересен тот факт, что и в иностранных [16–24], и в отечественных исследованиях [7, 25–28] отмечалась единая проблематика — отсутствие учета транзакционных издержек строительными организациями. Можно предположить, что это следствие их приравнивания к операционным затратам самими субъектами рынка, инициированное их имплицитным характером, а также информационной неопределенностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Специфика транзакционных издержек — их структура детерминируется состоянием институциональной среды, особенно в бюрократически емкой ИСС РФ. Государственная структура имеет стимул оптимизации транзакционных издержек субъектов ИСС РФ, поскольку это повысит их производительность труда. Экономия транзакционных издержек строительной организации выступала

² К примеру, для Московской агломерации он составляет около 7 рублей для смежных сфер.

Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. URL: <https://stroimsk.ru/news/kazhdyi-vlozhiennyi-v-stroiku-rubl-stimuliruiet-do-7-rubliei-investitsii-v-smiezhnyie-otrasli>

³ В российской академии наук встречалось схожее мнение, процитированное Минстроем РФ // Минстрой РФ. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/vesti-ekonomika-stroitelstvo-stanet-novym-drayverom-ekonomiki/>

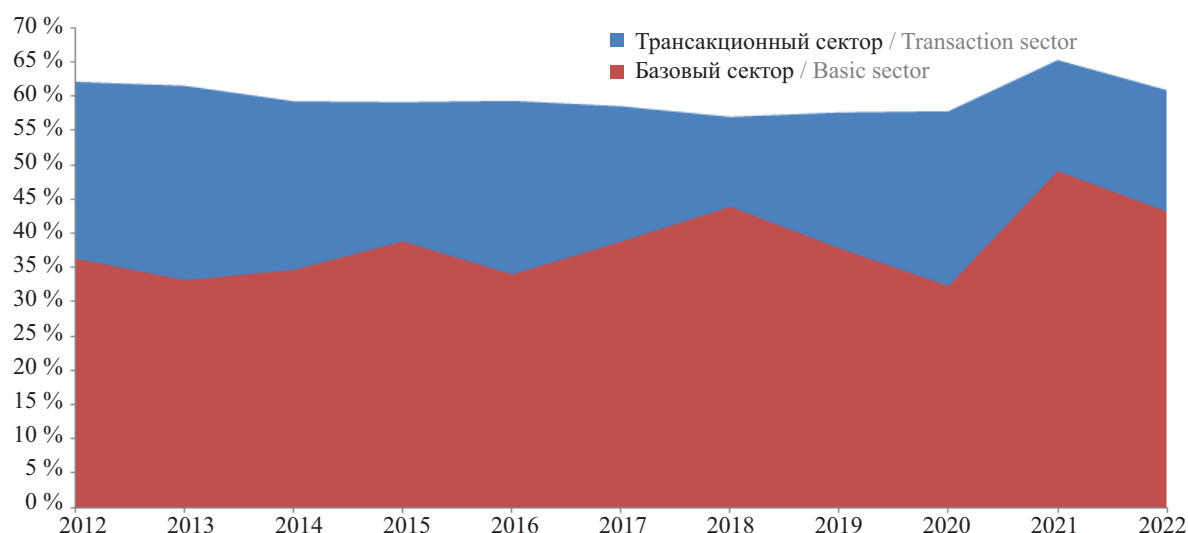


Рис. 3. Вклад секторов в экономический рост РФ в 2012–2022 гг. (составлено авторами на основании СНС от Росстата)

Fig. 3. Contribution of sectors to economic growth of the Russian Federation in 2012–2022 (compiled by the authors on the basis of the SNA from Rosstat)

в научной литературе в качестве фактора обеспечения ее устойчивого роста [9, 29], эффективности деятельности [26], рентабельности продаж [25], т.е. вышеуказанный тезис имеет право на существование. Чтобы преодолеть административные барьеры в строительстве, планируется определить характер распределения транзакционных издержек, т.е. выявить факторы, влияющие на их величину и структуру. Это позволит адресно (точно) воздействовать на элементы институциональной среды с целью снижения административных барьеров, ставших классической проблематикой.

В основных работах по тематике транзакционных издержек в строительстве применялось несколько методов проведения исследований. Одним из таких стал анкетный опрос участников профессионального рынка. Как правило, использовались рейтинги крупнейших менеджеров в строительном журнале Engineering News-Record и (или) членов Министерства транспорта США (FHWA), Ассоциаций владельцев строительных объектов США (СОАА), Ассоциаций государственных должностных лиц в области автомобильных дорог и транспорта США (AASHTO) для получения адресатов рассылки анкет. Полученные этим способом данные исследований [16–18, 20, 21] можно назвать основными, опираясь на рис. 5. Респонденты ранжировали (по шкале Лайкерта) влияние различных детерминант транзакционных издержек на характеристики строительных проектов, в которых они принимали участие. Особенностью указанных исследований является, во-первых, временной период (исследования проводились с 2011 до 2016 г.); во-вторых, они не отражают региональных особенностей инвестиционно-строительных циклов. В результате чего опираться только на указанные исследования было недостаточно, поскольку поми-

мо временных отличий присутствует и специфика инвестиционно-строительного цикла РФ. Однако их учет позволит в той или иной мере подтверждать гипотезы о влиянии транзакционных издержек на инвестиционно-строительные проекты (ИСП).

В качестве еще одного метода проведения тематического исследования встречался непосредственный анализ ИСП, отраженных в ранее проведенных исследованиях с добавлением собственных выборок [22]. Выборки состояли из проектов за 2015–2021 гг., общее их количество не превышало 100, среди критериев их группировки выступала схожесть (однородность) технологии производства (тип проекта). В качестве изучаемой единицы были транзакции, разделенные на четыре части: первая — набор типовых решений соответствующего сотрудника в рабочее время; вторая — причины выполнения задач (условно можно представить в виде предвиденных (набор должностных функций по проекту) или непредвиденных (возникли при изменениях параметров проектов)); третья — к какому результату привело выполнение задачи; четвертая — временные издержки решения задачи [22]. Территориальные зоны реализации проектов — Великобритания, Азия, Африка. Здесь вновь стоит отметить наличие региональных особенностей информации, однако это одно из немногочисленных исследований (в открытом доступе), которое работало непосредственно с данными ИСП. Также это исследование позволило расширить географические границы исследований (до этого исследования проводились преимущественно в Северной Америке).

В отечественной литературе [25–27] встречался и третий метод — удельный вес транзакционных издержек в накладных расходах строительных организаций, определяемый также эвристическими методами. Такой метод дает возможность установить

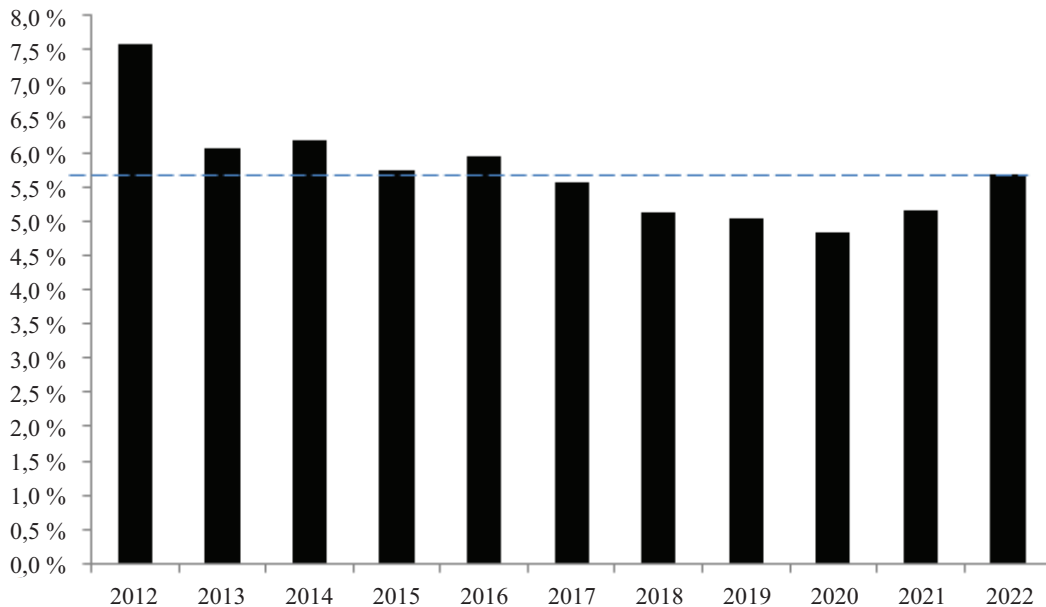


Рис. 4. Вклад строительной сферы РФ в экономический рост в 2012–2022 гг. (составлено авторами на основании СНС от Росстата)

Fig. 4. Contribution of the Russian construction sector to economic growth in 2012–2022 (compiled by the authors on the basis of the SNA from Rosstat)

примерный объем транзакционного сектора в отечественной экономике.

Встречались в отечественной литературе и работы в период с 2008–2014 гг. [7–10], в которых описывались идеи по управлению транзакционными издержками в строительстве, характерные для того периода (преобразования института саморегулирования, оптимизация информационного пространства в ИСП и т.д.).

Настоящее исследование опиралось на инструментальный институциональных теорий (транзакционных издержек, институциональных изменений, институциональных ловушек, синергетическое развитие организаций и др.), а также основные достижения отечественных и иностранных ученых в области изучения транзакционных издержек в строительстве. Выявление детерминант транзакционных издержек в строительстве, характерных для российской практики, позволит дополнить исследования в данной области.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В одной из работ Хуэйминь Ли, Дэвида Ардити и Чжуофу Ван [16], посвященной изучению факторов влияния транзакционных издержек, был проведен анализ государственно-частного партнерства (ГЧП) в строительстве с целью выявления связей между несколькими переменными и результирующей функцией. В качестве переменных выступили: предсказуемость владельца (заказчика) проекта, предсказуемость подрядчика проекта, эффективность управления проектом, определенность среды

транзакций проекта, а результирующей функцией — величина транзакционных издержек. В ходе исследования статистически выявлен следующий характер связей:

1. Если заказчику характерно детерминированное (предсказуемое) поведение в рамках проекта, то это лишь косвенно повлияет на снижение транзакционных издержек. Влияние оно окажет через определенность среды транзакций проекта, а также эффективность его менеджмента.

2. Если детерминированное (предсказуемое) поведение характерно подрядчику, то это прямо и косвенно повлияет на снижение транзакционных издержек, преимущественно через обеспечение эффективности управления проектом.

3. В качестве фактора, имеющего сильнейшее влияние на сокращение транзакционных издержек проекта, причем он латентно вытекает из пунктов 1 и 2, выявлена эффективность его менеджмента. Она позволяет стимулировать рост ритма строительства, в том числе за счет сокращения непредвиденных работ (доработок).

4. Прямо и косвенно (через детерминацию действий подрядчика и обеспечение эффективности менеджмента проекта) оказывает влияние на снижение издержек (транзакционных) проекта определенность среды транзакций.

Предсказуемость поведения экономического агента может, как правило, складываться за счет наличия опыта его взаимодействия с другими субъектами, причем в схожих по специфике проектах. Упомянутыми выше авторами была проанализирована выборка из проектов государственного част-



Fig. 5. Fundamental research on transaction costs by years [15]

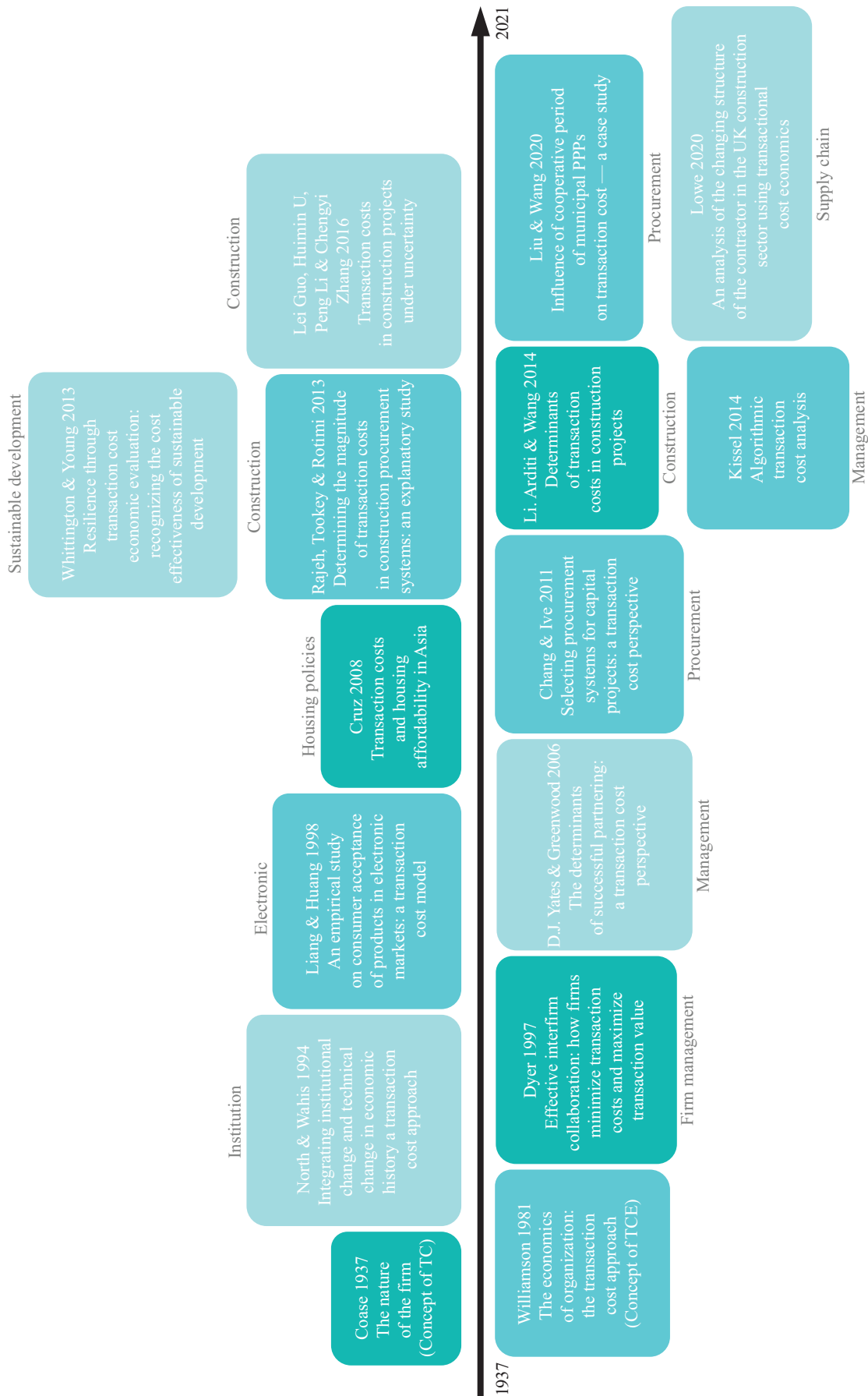


Рис. 5. Фундаментальные исследования по транзакционным издержкам в разрезе лет [15] (окончание)
Fig. 5. Fundamental research on transaction costs by years [15] (ending)

ного партнерства, т.е. сохранялась существенная роль государственной структуры. Проецируя на отечественный институт взаимодействия субъектов государственной и коммерческой структур (будь то ГЧП, государственные или корпоративные закупки и т.п.) термин «предсказуемость (детерминизм) поведения заказчика», стоит сказать, что существуют региональные отличия в проектных решениях. Как следствие, можно предположить, что влияние непредсказуемости поведения заказчиков (в рамках института взаимодействия субъектов государственной и коммерческой структур) будет косвенным, а существенно воздействовать будет на степень определенности среды транзакций и эффективность менеджмента проекта. В качестве распределителя некоторого объема транзакционных издержек в таком случае может выступить предсказуемость заказчика, выраженная через типовой контракт. Допустима связь между степенью принятия типового контракта в регионах и величиной транзакционных издержек, на которую влияет непредсказуемость поведения заказчика. То есть чем выше дифференциация контракта в регионе, тем выше транзакционные издержки данного типа (непредсказуемость поведения заказчика).

Обращаясь к чисто рыночной контрактации, т.е. рассматривая непредсказуемость подрядчика (субподрядчика), можно также допустить, что она будет снижаться по мере накопления опыта взаимодействия экономических агентов между собой при схожих проектах. Однако в целях государственной структуры обеспечить конкурентную среду в регионе, как следствие квотирование контрактов подрядчика с субподрядчиками, относящихся к субъектам малого и среднего предпринимательства (причем в параллели с условием отсутствия аффилированных лиц). То есть государственная структура стремится дифференцировать контрагентов подрядчика, чтобы происходило перераспределение капитала через различные каналы (в целях сбалансированности социально-экономической системы).

Со стороны подрядчика указанные ранее действия государственной структуры означают снижение предсказуемости его контрагентов, как следствие прямое и косвенное влияние на величину транзакционных издержек через изменение эффективности менеджмента проекта. В среде транзакций происходят изменения, поскольку создается необходимость поиска новых контрагентов на рынке, издержки увеличиваются. Транзакционные издержки организации и проведения подрядных торгов, документального их обеспечения, контрактинга, контроля увеличиваются.

Интересным является учет организационно-институциональной специфики стран при выявлении факторов и их силы влияния на величину транзакционных издержек. Так, например, отсутствие предсказуемости поведения заказчика сильнее влияет

в Китае относительно США, а непредсказуемость подрядчика — прямо противоположно [18]. Такое разделение обосновывается ролью фондового рынка США в качестве регулятора деятельности экономических агентов, характерной для англо-американской модели корпоративного контроля. Китай скорее относится к германо-японской модели корпоративного контроля, как и РФ. Причем исследователи и из Китая [30], и из РФ [6, 13, 31] отмечают, что уровень транзакционных издержек в национальных строительных сферах выше естественного, что может свидетельствовать (косвенно, поскольку требуется глубокая выборка по всем представителям германо-японской модели) об относительной эффективности (по уровню транзакционных издержек) англо-американской модели. По большей части это связано с тем фактом, что транзакционные издержки, основная их часть, формируются из-за формальных институтов, устанавливаемых государственной структурой. Очевидно, что в германо-японской модели влияние государственной структуры на транзакционные издержки сильнее, чем в англо-американской, которая регулируется фондовым рынком (предпринимателями). Для первой (англо-американской) модели характерна ведущая роль менеджеров, а не владельца, поскольку на показатели деятельности организации, следовательно, курс акций, они имеют, как правило, существенное влияние. Для второй (германо-японской) — влияние менеджеров слабее влияния владельца, причем роль фондового рынка уступается финансовым институтам (банкам).

Роль «сильного владельца» (его институциональной ренты) организации, очевидно, характерна для российской экономики, поскольку именно ему принадлежит ведущая роль при заключении отношений контрактов стратегической направленности. В работе В.М. Полтеровича, в частности, были рассмотрены модели выбора характера взаимодействия экономических агентов, характерные для различных групп стран, где сепарация представлена в виде «либеральной рыночной» (краткосрочные контракты, основанные на рыночных сигналах) и «скоординированной рыночной» (стратегические контракты, включающие переговоры и обмен информацией) [19]. Основываясь на подобном разделении, российскую экономику было целесообразно отнести скорее ко второму типу. В результате чего российской экономике теоретически присущи две характеристики: первичная роль владельца, массовое распространение стратегических контрактов. Это в свою очередь предполагает заключение множества отношений контрактов, связанных с некоторым набором транзакционных издержек.

Возвращаясь к детерминантам транзакционных издержек в строительстве [16–21], упомянутым ранее, проецируя две указанные выше характеристики российского рынка, можно предположить

следующее. Транзакционные издержки в ИСС РФ главным образом формируются под воздействием детерминанты «полнота отношенческих контрактов, направленных на обеспечение предсказуемости заказчика и (или) подрядчика (субподрядчика)».

Полноту отношенческого контракта можно оценивать на основании показателя его неопределенности, представленной в виде разницы между объемом необходимых и имеющихся соглашений (объемом информации) для предвидения поведения противоположной стороны при различных ситуациях. Транзакционные издержки на поддержание отношенческого контракта в строительстве высоки, так как его продукция является специфичной. Поскольку строительная продукция специфична, требуется непрерывная связь между сторонами транзакции, причем в условиях отсутствия обезличенности [32]. То есть строительная деятельность скорее сопряжена с иерархической интеграцией, а не с рыночной контрактацией. По Р. Коузу⁴ границы организации (в его институциональной трактовке использовался термин «фирма») заканчиваются тогда, когда в ней транзакционные издержки на совершение сделки (транзакции обмена) выше, чем при рынке. В результате чего можно предположить, что административные барьеры, действующие на строительном рынке, делают эффективным не конкуренцию, а концентрацию производства. Данный вывод гармонизируется с упомянутой ранее характеристикой В.М. Полтеровича о стратегическом, а не рыночном взаимодействии агентов в некоторых странах, которую авторы настоящего исследования проецировали на российскую экономику. Учитывая концентрацию строительного рынка РФ⁵, можно предположить, что институциональная (политическая) рента группы застройщиков позволяет сокращать транзакционные издержки экономических агентов, интегрированных в них, т.е. выступает их распределителем. Роль институциональной ренты вновь стала предметом активного обсуждения в отечественной научной литературе, где и представлена характеристика данного термина [33, 34]. При этом иерархическая интеграция сопряжена с изменением структуры транзакционных издержек, когда некоторые экзогенные (связанные с рыночной контрактацией) сменяются на эндогенные (внутрикорпоративные) [26, 27, 35].

Одним из актуальных направлений смещения рыночной контрактации в иерархическое взаимодействие («фирму»), причем оно может носить имплицитный характер, является индустриальное строительство, интенсификация которого проис-

ходит в РФ⁶, ориентиром потенциально является Китай [30, 36]. Ориентир в том смысле, что в Китае обсуждаются региональные (местные) практики по обязательным требованиям к использованию готовых конструкций. Если они будут реализованы в виде общеобязательных для регионов Китая требований, то существенным образом сократятся транзакционные издержки. Для РФ проблематика дифференциации региональных практик в жилищном строительстве (жилищной политике) актуальна, почему и необходимо было рассматривать теорию транзакционных издержек. В результате чего коллективность (гармонизация) региональных практик может выступать распределителем транзакционных издержек.

В мировой литературе по транзакционным издержкам в строительстве принято за основу разделение их по стадиям проектов, так, существуют предконтрактная и постконтрактная [11, 16–21, 27, 31, 37–42]. Постконтрактная стадия начинается после заключения договора (контракта) с подрядчиком. По мнению авторов настоящего исследования, необходима некоторая степень детализации указанного разделения, поскольку жизненный цикл ИСП имеет четкие различия, например, между стадией строительства и эксплуатации объекта недвижимости. Поэтому и транзакционные издержки должны иметь минимум три стадии: предконтрактная (до заключения контракта с подрядчиком), постконтрактная (после заключения контракта с подрядчиком) и еще одна (после ввода объекта недвижимости в эксплуатацию). Сущность контракта в институциональной трактовке (и его разновидности) позволяет сделать вывод о том, что постконтрактная стадия встречается в рамках инвестиционно-строительного цикла несколько раз. Этот факт имеет особое значение для профессионального и научного обществ, поскольку взаимодействие субъектов на различных стадиях инвестиционно-строительного цикла отличается друг от друга, следовательно, меняются характеристики заключаемых контрактов.

Если кратко затронуть теневой сектор (составляющую), то можно предположить, что отношенческие контракты, соответственно и транзакционные издержки, на предконтрактной стадии будут связаны с обеспечением предсказуемости поведения участников ИСП (например, за счет привлечения конкретных контрагентов в проект с государственным участием [13]). На стадии строительства (постконтрактной) отношенческие контракты будут связаны с интенсификацией процедур строительного контроля и (или) надзора, межевания или сервитута (если возникнут некоторые изменения, например, из-за поступления жалоб), получения общеобяза-

⁴ Коуз Р.Г. Природа фирмы. 1937. URL: <http://analytical-school.seinst.ru/milestones-of-economic-thought/VEHI2%20Coase.pdf>

⁵ Ранжирование застройщиков РФ по объемам текущего строительства // ЕРЗ. URL: <https://erzrf.ru/top-zastroyshchikov/rf?topType=0&date=230501>

⁶ Следует из рекомендаций Комитета Совета Федерации от 16.11.2020 № 235 // Совет Федерации ФСРФ. URL: <http://council.gov.ru/activity/activities/roundtables/121483/>

тельной документации и т.д. На стадии эксплуатации, например жилого комплекса, особую роль будет играть восприятие потребителями строительной продукции, которое может повлиять на репутацию, следовательно, объем продаж застройщика. При этом усилением расхода ресурсов потребителей, связанного с изменением восприятия строительной продукции (жилой недвижимости), выступает показатель удовлетворительной работы управляющей компании. Чем менее удовлетворительная ее работа (по восприятию жильцов), тем выше вероятность того, что потребители (жильцы) будут задумываться о качестве приобретенной продукции, состоянии общей и (или) придомовой территории и др. Для снижения данной вероятности можно выстроить институты так, чтобы субъекты их среды не задумывались о существующих правилах и нормах поведения. Этот инструмент открыто или латентно фигурировал в работах Р. Коуза (упомянутой ранее), Д. Норта и др. Д. Норт описывал ситуацию, при которой субъекты рынка могут повторять действия конкурентов, извлекая доход от обхода формальных правил⁷. То есть застройщики, возвращаясь к описанной выше стратегии, могут перенимать опыт друг друга в обходе формальных правил (например, поступления жалоб граждан в судебные инстанции, как следствие рост трансакционных издержек застройщика), следовательно, трансакционные издержки могут распределяться и под воздействием данного фактора (доходный или эффективный опыт конкурентов в обходе формальных правил).

В качестве еще одного распределителя трансакционных издержек, который будет рассмотрен, выступает цифровизация взаимоотношений участников ИСС, описываемая в научной литературе [42–44]. Авторами отмечается, что рассмотрение цифровизации через аспект только снижения трансакционных издержек не является достаточным. Цифровизация меняет структуру трансакционных издержек, так сокращаются издержки на поиск и обработку информации, контрактацию и т.п. Однако недостаточно оснований говорить о том, что в той же мере сокращаются и трансакционные издержки, связанные с контролем и защитой прав собственности. Это объясняется необходимостью непрерывного контроля над качеством исходной информации, рассчитанных показателей и т.п., а также обеспечения ее сохранности, т.е. предотвращение утечек государственных, коммерческих и научных тайн. Последний пункт и детерминирует рост трансакционных издержек на обеспечение защиты прав собственности.

Риск утечки данных и при цифровизации взаимодействия, и при аутсорсинге того или иного вида является фактором, влияющим на величину

трансакционных издержек. Влияние риска зависит от склонности каждого конкретного субъекта к обеспечению информационной безопасности (сохранности данных). Характерным примером потенциала утечек государственных, коммерческих и научных тайн может выступить международный прогноз рынка инжиниринга. Российский рынок соответствует мировым темпам роста инжиниринга (в период 2011–2021 гг. среднегодовой темп роста составлял порядка 4,7 % в год, если рассчитывать по выручке инжиниринговых организаций), при этом прогнозируется рост 6,6 % в период 2022–2026 гг. Среднегодовой рост международного рынка аутсорсинга инжиниринговых услуг при этом составит 18,8 % в тот же период. Уже в 2021 г. рынок аутсорсинга оценивался в 1030 млрд долл., а инжиниринг около 1500–1600 млрд долл.⁸ Учитывая рассмотренные в настоящем исследовании детерминанты трансакционных издержек в ИСС (предсказуемость субъектов, полнота контрактов и т.д.), инжиниринг будет играть особую роль в ней, поскольку соответствующие организации (инжиниринговые) позволяют обеспечить предсказуемую среду транзакций. Роль факторинговых, инжиниринговых, консалтинговых организаций в ИСС является особой для трансакционных издержек, поэтому требует дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования выявлено несколько распределителей трансакционных издержек в ИСС РФ: предсказуемость заказчика, институциональная рента подрядчика, институциональная рента застройщика, полнота отношенческих контрактов обеспечения предсказуемости заказчика, информация о доходности обхода формальных правил субъектами ИСС, цифровизация взаимодействия субъектов. Указанные выше распределители трансакционных издержек, как следствие, будут иметь разную структуру в зависимости от преобладающего типа взаимодействия (стратегическое или рыночное) субъектов ИСС. Специфика российской ИСС — превалирование стратегического взаимодействия субъектов над рыночным, что сопряжено с ростом трансакционных издержек, направленных на поддержание отношенческих контрактов, а также со склонностью агентов к участию в теневом секторе экономики.

Полученные результаты исследования не противоречат международным уже существующим, они дополняют эти исследования с позиций институциональных особенностей инвестиционно-строительного цикла РФ. Особенности отечественного цикла, описанные в статье, позволяют расширить

⁷ Норт Д. Институты, институциональные изменения и функционирование экономики. 1990. URL: <http://cee-moscow.com/doc/izd/North.pdf>

⁸ Engineering Services Global Market Report // The Business Research Company. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/engineering-services-global-market-report>

границы анализа инвестиционных и строительных процессов, а также предметно подойти к вопросу о построении перечня статистических данных, которые следовало бы учитывать при разработке государственных программ, направленных на развитие не только строительной, но и смежных видов экономической деятельности.

Настоящее исследование дает возможность сделать вывод в пользу того, что существующее изучение деловой активности в строительстве⁹ может быть дополнено учетом параметра «транзакционные издержки». Описание особенности данного термина и потенциальные статьи транзакционных издержек рекомендуется предоставлять респонден-

там заранее, что позволит предметно подойти к учету административных барьеров в строительстве. Необходимость моделирования показателей транзакционных издержек в ИСС РФ для выдвижения целевых значений для индикативного планирования является актуальной.

Полученные результаты исследования также сопоставлены с тенденциями развития форм организации предпринимательской деятельности и видов интеграции субъектов в рамках строительной сферы и смежных для нее секторов. В работе уже упоминалось распространение инжиниринга и цифровых экосистем в российской экономике, а главной причиной этому, по мнению авторов, является непосредственно резерв оптимизации транзакционных издержек. Это обосновывает необходимость акцента на специфике контрактных отношений, отраженной в настоящей статье.

⁹ Ее оценкой занимается Росстат и Центр конъюнктурных исследований Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сухарев О.С. Структурная и технологическая динамика российской экономики : доклад. М. : Институт экономики РАН, 2020. 53 с.
2. Владимирова И.Л., Земсков П.И. Методика управления стоимостью инвестиционно-строительного проекта на основе транзакционных издержек // Инновации и инвестиции. 2017. № 2. С. 11–16. EDN ZUKGQV.
3. Владимирова И.Л., Земсков П.И. Учет институциональных факторов в управлении инвестиционно-строительными проектами // Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2017. С. 21–26. EDN YMTRBL.
4. Земсков П.И. Управление стоимостью инвестиционно-строительного проекта с учетом институциональных факторов : дис. ... канд. экон. наук. М., 2017. 203 с.
5. Комкова А.А., Шаститко А.Е. Количественная оценка транзакционного сектора: возможности, ограничения, результаты // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал. 2014. Т. 6. № 3 (13). С. 25–48. EDN TZKYJH.
6. Макаров Д.А., Юденко М.Н. Влияние институционального равновесия на развитие бизнеса // Современный менеджмент: проблемы и перспективы : сб. ст. по итогам XVI Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 214–218. EDN IGSSNI.
7. Бузырев В.В., Кашина Е.В. Оптимизация транзакционных издержек на основе показателя стоимости строительного бизнеса // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 6 (35). С. 163–170. EDN QZATZT.
8. Шаталкин И.А. Транзакционные издержки фирмы: влияние информационных технологий : дис. ... канд. экон. наук. СПб., 2014. 191 с.
9. Половникова Н.А., Юденко М.Н. Транзакционные издержки в деятельности хозяйствующих субъектов в строительстве // Экономика строительства. 2012. № 1 (13). С. 32–36. EDN OPHIMX.
10. Половникова Н.А. Роль транзакционных издержек при взаимодействии участников инвестиционно-строительного комплекса // Проблемы современной экономики. 2012. № 4 (44). С. 288–291. EDN PZHBSD.
11. Березин А.Э., Городнова Н.В., Машнов М.А., Созонов Е.П. Институциональный подход: методика оценки транзакционных издержек // International Scientific and Practical Conference World Science. 2016. Т. 4. № 8 (12). С. 4–8. EDN WHXSAT.
12. Hosseinian S.M., Tavakoli M. Markets, hierarchies, or hybrids as alternative governance structures in construction contracts: transaction cost economics analysis // Journal of Construction Engineering and Management. 2023. Vol. 149. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0002426
13. Abdul-Aziz A.-R. Applications of mainstream economic theories to the construction industry: transaction costs // Research Companion to Construction Economics. 2022. Pp. 178–198. DOI: 10.4337/9781839108235.00016
14. Лукичев М.Ю. Управление транзакционными издержками строительных корпораций : дис. ... канд. экон. наук. М., 2011. 157 с.
15. Zainuddin F.K., Mustapa F.D., Misnan S.H. Transaction cost economics for housing development: systematic literature review // International Journal of

Innovation and Industrial Revolution. 2022. Vol. 4. Issue 12. Pp. 16–23. DOI: 10.35631/ijirev.412002

16. Li H., Arditi D., Wang Z. Factors that affect transaction costs in construction projects // Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 139. Issue 1. Pp. 60–68. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000573

17. Li H., Arditi D., Wang Z. Determinants of transaction costs in construction projects // Journal of Civil Engineering and Management. 2015. Vol. 21. Issue 5. Pp. 548–558. DOI: 10.3846/13923730.2014.897973

18. Li H., Zhang C. A comparative study between China and USA on the influencing path of transaction costs in construction projects // Proceedings of International Structural Engineering and Construction. 2016. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.14455/ISEC.res.2016.30

19. Полтерович В.М. Конкуренция, сотрудничество и удовлетворенность жизнью. Часть 2. Основы лидерства — коллаборативные преимущества // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2022. Т. 15. № 3. С. 42–47. DOI: 10.15838/esc.2022.3.81.2. EDN IQHEVI.

20. Li H., Arditi D., Wang Z. Transaction costs incurred by construction owners // Engineering, Construction and Architectural Management. 2014. Vol. 21. Issue 4. Pp. 444–458. DOI: 10.1108/ECAM-07-2013-0064

21. Li H., Arditi D., Wang Z. Transaction-related issues and construction project performance // Construction Management and Economics. 2012. Vol. 30. Issue 2. Pp. 151–164. DOI: 10.1080/01446193.2012.655254

22. Atanasov V.A., Greenwood D.J., Ross H., Sanchez D.E. Forensic delay analysis as evidence of transaction costs in construction projects // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1101. Issue 5. P. 052009. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/5/052009

23. Zainuddin F.K., Mustapa F.D., Mustapa M. Debunking the unaffordable houses in Malaysia from the transaction cost economics perspectives: a preliminary study // International Journal of Accounting, Finance and Business (IJAFB). 2022. Vol. 7. Issue 39. Pp. 106–114. DOI: 10.55573/IJAFB.073911

24. Ramesh S., Shahzad W., Sutrisna M. Transaction cost of Offsite Construction (OSC): A New Zealand study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1101. Issue 4. P. 042044. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/4/042044

25. Юденко М.Н., Юденко Е. Влияние транзакционных издержек на эффективность строительных организаций // Вестник факультета управления СПбГЭУ. 2017. № 2. С. 67–75. EDN YLJIKO.

26. Юденко М.Н., Ильина А.А. Оценка подходов к классификации транзакционных издержек в инвестиционно-строительном комплексе // Экономика строительства. 2013. № 1 (19). С. 24–28.

27. Юденко М.Н. Институциональные аспекты предпринимательской деятельности в строи-

тельстве // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Экономика и управление. 2021. № 1 (49). С. 5–15. DOI: 10.25686/2306-2800.2021.1.5. EDN YQRRLS.

28. Алексеев А.А., Беляева Е.Ю. К вопросу о транзакционных издержках в инвестиционно-строительном комплексе // Вопросы экономики и права. 2018. № 119. С. 102–110. EDN YABACD.

29. Городнова Н.В. Разработка центра учета транзакционных издержек предприятия // Экономика, статистика и информатика // Вестник УМО. 2015. № 3. С. 47–50. EDN TWUSUZ.

30. Haaskjold H., Andersen B., Langlo J.A. Dissecting the project anatomy: Understanding the cost of managing construction projects // Production Planning & Control. 2023. Vol. 34. Issue 2. Pp. 117–138. DOI: 10.1080/09537287.2021.1891480

31. Асаул А.Н., Иванов С.Н. Снижение транзакционных затрат в строительстве за счет оптимизации информационного пространства. СПб. : АНО ИПЭВ, 2008. С. 6–200. EDN TXHOMOC.

32. Бузырев В.В., Юденко М.Н. Роль специфических активов в снижении транзакционных издержек в строительстве // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2009. № 3. С. 45–49. EDN KHQOEN.

33. Блохин А.А., Стерник С.Г. Институциональная рента как нерыночный механизм экономического роста // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2019. Т. 17. С. 7–26. DOI: 10.29003/m808.sp_ief_ras2019/7-26. EDN AVEJKW.

34. Corsi S., Feranita F., De Massis A. International R&D partnerships: The role of government funding in reducing transaction costs and opportunistic behavior // R&D Management. 2021. Vol. 52. Issue 3. Pp. 530–547. DOI: 10.1111/radm.12497

35. Шенилова Н.П. Роль транзакционных издержек в управлении проектами корпорации // Корпоративные финансы. 2016. Т. 10. № 1. С. 88–101. DOI: 10.17323/j.jcfr.2073-0438.10.1.2016.88-101

36. Wu H., Qian Q.K., Straub A., Visscher H.J. Factors influencing transaction costs of prefabricated housing projects in China: developers' perspective // Engineering, Construction and Architectural Management. 2022. Vol. 29. Issue 1. Pp. 476–501. DOI: 10.1108/ECAM-07-2020-0506

37. Юденко М.Н., Гончарова М.С. Оценка влияния социальных институтов на эффективность предпринимательской деятельности строительных организаций // Микроэкономика. 2018. № 5. С. 71–77. EDN YMVOKL.

38. Блохин А.А., Стерник С.Г., Телешев Г.В. Трансформация институциональной ренты застройщиков многоквартирного жилья в институциональную ренту кредитных организаций // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2019. № 1 (208). С. 6–17. DOI: 10.24411/2072-4098-2019-10101. EDN YTOFZJ.

39. Маричев С.Г. Анализ транзакционных издержек трансфера инноваций в экономику в части патентного права в России // Искусственные общества. 2019. Т. 14. № 4. С. 14. DOI: 10.18254/S207751800007732-4. EDN WJTAWT.

40. Sama H., Ndunguru P., Nsimbila P. Transaction costs and competitive tendering in public procurement: Moderating role of integrity // African Journal of Business Management. 2022. Vol. 16. Issue 6. Pp. 130–146. DOI: 10.5897/AJBM2021.9235

41. Городнова Н.В. Транзакционный анализ и оценка издержек интегрированных структур с государственным участием как способ мониторинга эффективности их деятельности // Экономический анализ: теория и практика. 2010. № 28 (193). С. 12–17. EDN MUAYXP.

42. Городнова Н.В. Сокращение транзакционных издержек в цифровой экономике // Креативная экономика. 2022. Т. 16. № 6. С. 2073–2092. DOI: 10.18334/ce.16.6.114818. EDN KUTUDF.

43. Козырев А.Н. Цифровизация, математические методы и системный кризис экономической науки // Цифровая экономика. 2019. № 4 (8). С. 5–20. DOI: 10.34706/DE-2019-04-01. EDN NVWAEA.

44. Веретенникова А.Ю., Козинская К.М. Моделирование влияния институциональной среды на развитие цифровых платформ и экономики совместного пользования // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2022. Т. 15. № 5. С. 257–273. DOI: 10.15838/esc.2022.5.83.14. EDN EKOUUT.

Поступила в редакцию 8 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 28 августа 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Роман Русланович Козаков — магистрант; Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ); 191023, г. Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д. 30–32, литер А; РИНЦ ID: 1186538, kozakov-2001@list.ru;

Вадим Аркадьевич Кошечев — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики строительства и ЖКХ, заместитель декана по научной работе; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 355073, Scopus: 57212885664, ORCID: 0000-0003-4410-6440; npmos@bk.ru.

Вклад авторов:

Козаков Р.Р. — идея, сбор и обработка материала, написание итогового текста и выводов.

Кошечев В.А. — научное руководство, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sukharev O.S. *Structural and technological dynamics of the Russian economy*. Moscow, Institute of Economics RAS, 2020; 53. (rus.).

2. Vladimirova I.L., Zemskov P.I. Cost management methodology for investment and construction projects based on transaction costs. *Innovation and Investment*. 2017; 2:12-15. EDN ZUKGQV. (rus.).

3. Vladimirova I.L., Zemskov P.I. Considering institutional factors in project construction management. *Materials of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 110th anniversary of the Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov*. 2017; 21-26. EDN YMTRBL. (rus.).

4. Zemskov P.I. *Management of the cost of an investment and construction project, taking into account institutional factors : dis. ... PhD in Economics*. Moscow, 2017; 203. (rus.).

5. Anastasia K., Shastitiko A. Measuring the transaction sector: opportunities, constraints, results. *Scientific Research of Faculty of Economics. Electronic Journal*. 2014; 6(3):(13):25-48. EDN TZKYJH. (rus.).

6. Makarov D.A., Yudenko M.N. The impact of institutional equilibrium on business development. *Modern Management: Problems and Prospects : XV International scientific-practical conference*. 2021; 214-218. EDN IGSSNI. (rus.).

7. Buzyrev V.V., Kashina E.V. Optimization of transactional expenses on the basis of the construction business value indicator. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 6(35):163-170. EDN QZATZT. (rus.).

8. Shatalkin I.A. *Transaction costs of the firm: impact of information technologies : dis. ... candidate of economic sciences*. St. Petersburg, 2014; 191. (rus.).

9. Polovnikova N.A., Yudenko M.N. Transaction costs in the activities of economic entities in construction. *Construction Economics*. 2012; 1(13):32-36. EDN OPHIMX. (rus.).

10. Polovnikova N.A. The role of transactional costs in the interaction of participants in investment and construction complex. *Problems of the modern economy*. 2012; 4(44):288-291. EDN PZHBSD. (rus.).

11. Berezin A.E., Gorodnova N.V., Mashnov M.A., Sozonov E.P. Institutional approach: methodology for assessing transaction costs. *International Scientific and Practical Conference World Science*. 2016; 4(8):4-8. EDN WHXSAT. (rus.).

12. Hosseinian S.M., Tavakoli M. Markets, hierarchies, or hybrids as alternative governance structures in construction contracts: Transaction cost economics analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2023; 149(1). DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0002426

13. Abdul-Aziz A.-R. Applications of mainstream economic theories to the construction industry: transaction costs. *Research Companion to Construction Economics*. 2022; 178-198. DOI: 10.4337/9781839108235.00016

14. Lukichev M.Yu. *Managing transaction costs of construction corporations : dis. ... candidate of economic sciences*. Moscow, 2011; 100-130. (rus.).

15. Zainuddin F.K., Mustapa F.D., Misnan S.H. Transaction cost economics for housing development: systematic literature review. *International Journal of Innovation and Industrial Revolution*. 2022; 4(12):16-23. DOI: 10.35631/ijirev.412002

16. Li H., Arditi D., Wang Z. Factors that affect transaction costs in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2013; 139(1):60-68. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000573

17. Li H., Arditi D., Wang Z. Determinants of transaction costs in construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2015; 21(5):548-558. DOI: 10.3846/13923730.2014.897973

18. Li H., Zhang C. A comparative study between China and USA on the influencing path of transaction costs in construction projects. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*. 2016; 3(1). DOI: 10.14455/ISEC.res.2016.30

19. Polterovich V.M. Competition, collaboration, and life satisfaction. Part 2. The fundament of leadership — collaborative advantage. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2022; 15(3):42-47. DOI: 10.15838/esc.2022.3.81.2. EDN IQHEVI. (rus.).

20. Li H., Arditi D., Wang Z. Transaction costs incurred by construction owners. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2014; 21(4):444-458. DOI: 10.1108/ECAM-07-2013-0064

21. Li H., Arditi D., Wang Z. Transaction-related issues and construction project performance. *Construction Management and Economics*. 2012; 30(2):151-164. DOI: 10.1080/01446193.2012.655254

22. Atanasov V.A., Greenwood D.J., Ross H., Sanchez D.E. Forensic delay analysis as evidence of transaction costs in construction projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1101(5):052009. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/5/052009

23. Zainuddin F.K., Mustapa F.D., Mustapa M. Debunking the unaffordable houses in Malaysia from the transaction cost economics perspectives: A pre-

liminary study. *International Journal of Accounting, Finance and Business (IJAFB)*. 2022; 7(39):106-114. DOI: 10.55573/IJAFB.073911

24. Ramesh S., Shahzad W., Sutrisna M. Transaction Cost of Offsite Construction (OSC): A New Zealand Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1101(4):042044. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/4/042044

25. Yudenko M.N., Yudenko E.A. The impact of transaction costs on the efficiency of construction organizations. *Bulletin of the Faculty of Management of St. Petersburg State University of Economics*. 2017; 2:67-75. EDN YLJIKO. (rus.).

26. Yudenko M.N., Il'ina A.A. Evaluation of approaches to the classification of transaction costs in the investment and construction complex. *Construction Economics*. 2013; 1(19):24-28. (rus.).

27. Iudenko M.N. Institutional aspects of entrepreneurial activity in the construction sector. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Economy and Management*. 2021; 1(49):5-15. DOI: 10.25686/2306-2800.2021.1.5. EDN YQRRLS. (rus.).

28. Alekseev A.A., Beliaeva E.Yu. About transaction costs in the investment-construction complex. *Issues of Economics and Law*. 2018; 119:102-110. EDN YABACD. (rus.).

29. Gorodnova N.V. Development of a center for the accounting transaction costs of the enterprise. *Economics, statistics and informatics. Bulletin of the educational-methodical association*. 2015; 3:47-50. EDN TWUSUZ. (rus.).

30. Haaskjold H., Andersen B., Langlo J.A. Dissecting the project anatomy: Understanding the cost of managing construction projects. *Production Planning & Control*. 2023; 34(2):117-138. DOI: 10.1080/09537287.2021.1891480

31. Asaul A.N., Ivanov S.N. *Reducing transaction costs in construction due to optimization of the information space*. St. Petersburg, ANO IPEV, 2008; 6-200. EDN TXOMOC. (rus.).

32. Buzyrev V.V., Yudenko M.N. The role of specific assets in transaction costs decrease in construction. *Bulletin of Baikal State University*. 2009; 3:45-49. EDN KHQOEN. (rus.).

33. Blokhin A.A., Sternik S.G. Institutional rent as a non-market mechanism of economic growth. *Scientific works: Institute of Economic Forecasting Russian Academy of Sciences*. 2019; 17:7-26. DOI: 10.29003/m808.sp_ief_ras2019/7-26. EDN AVEJKW. (rus.).

34. Corsi S., Feranita F., De Massis A. International R&D partnerships: The role of government funding in reducing transaction costs and opportunistic behavior. *R&D Management*. 2021; 52(3):530-547. DOI: 10.1111/radm.12497

35. Shepilova N.P. The role of transaction costs in corporate project management. *Journal of Corporate Fi-*

nance Research. 2016; 10(1):88-101. DOI: 10.17323/j.jcfr.2073-0438.10.1.2016.88-101. (rus.).

36. Wu H., Qian Q.K., Straub A., Visscher H.J. Factors influencing transaction costs of prefabricated housing projects in China: developers' perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2022; 29(1):476-501. DOI: 10.1108/ECAM-07-2020-0506

37. Yudenko M.N., Goncharova M.S. Assessment of the impact of social institutions on efficiency of build organizations business activity. *Microeconomics*. 2018; 5:71-77. EDN YMVOKL. (rus.).

38. Blokhin A.A., Sternik S.G., Teleshev G.V. Transformation of the institutional rent of developers of multi-family housing into institutional rent of credit organizations. *Property Relations in the Russian Federation*. 2019; 1(208):6-17. DOI: 10.24411/2072-4098-2019-10101. EDN YTOFZJ. (rus.).

39. Marichev S. Analysis of innovations-to-economy transfer transaction costs in terms of patent law in Russia. *Artificial Societies*. 2019; 14(4):14. DOI: 10.18254/S207751800007732-4. EDN WJTAWT. (rus.).

40. Sama H., Ndunguru P., Nsimbila P. Transaction costs and competitive tendering in public procure-

ment: Moderating role of integrity. *African Journal of Business Management*. 2022; 16(6):130-146. DOI: 10.5897/AJBM2021.9235

41. Gorodnova N.V. Transactional analysis and cost evaluation of integrated structures with state participation as a way of monitoring their efficiency. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2010; 28(193):12-17. EDN MUAYXP. (rus.).

42. Gorodnova N.V. Reducing transaction costs in the digital economy. *Creative Economy*. 2022; 16(6):2073-2092. DOI: 10.18334/ce.16.6.114818. EDN KUTUDF. (rus.).

43. Kozyrev A.N. Digitalization, mathematical methods and the systemic crisis of economic science. *Digital Economy*. 2019; 4(8):5-20. DOI: 10.34706/DE-2019-04-01. EDN NVWAEA. (rus.).

44. Veretennikova A.Yu., Kozinskaya K.M. Modeling the impact of the institutional environment on the development of digital platforms and the sharing economy. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2022; 15(5):257-273. DOI: 10.15838/esc.2022.5.83.14. EDN EKOUUT. (rus.).

Received June 8, 2023.

Adopted in revised form on August 28, 2023.

Approved for publication on August 28, 2023.

B I O N O T E S : **Roman R. Kozakov** — master's student; **St. Petersburg State University of Economics (SPbSUE)**; letter A 30-32 emb. Griboedov Canal, St. Petersburg, 191023, Russian Federation; SPIN-code: 9412-0420, ID RSCI: 1186538, kozakov-2001@list.ru;

Vadim A. Koshcheev — Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Economics of Construction and Housing and Communal Services, Deputy Dean for Research; **St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7268-4941, ID RSCI: 355073, Scopus: 57212885664, ORCID: 0000-0003-4410-6440; npmos@bk.ru.

Contribution of the authors:

Roman R. Kozakov — idea, data gathering and processing, writing of the article, writing the source text, final conclusions.

Vadim A. Koshcheev — author supervising, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Анализ применения цифровых технологий в государственном и муниципальном управлении

Наталья Анатольевна Солопова¹, Жанна Владимировна Селезнева²

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

²Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализируются вопросы применения цифровых технологий (ЦТ) в государственном и муниципальном управлении (ГМУ). Рассматривается прогресс, достигнутый в области цифровой трансформации ГМУ, формулируются основные рекомендации по совершенствованию этого процесса.

Материалы и методы. Теоретико-методологической основой послужили научные труды российских и иностранных ученых, посвященные изучению применения ЦТ в ГМУ. Материалами исследования стали данные Росстата, Минцифры России, реферативной базы Scopus, разработки Института статистических исследований и экономики знаний НИУ «Высшая школа экономики».

Результаты. Проведенный анализ практики применения ЦТ в ГМУ доказал, что подобные технологии активно используются в России. Стоимость взаимодействия граждан и государства в таком формате обходится вдвое дешевле, чем в традиционном, очном. В период пандемии темпы цифровизации государственного сектора существенно ускорились. Электронные системы оплаты, открытые данные и государственные порталы, системы управления информацией и электронный документооборот могут служить примерами использования ЦТ в ГМУ. Цифровые технологии дают правительству возможность предоставлять гражданам и предприятиям различные услуги и онлайн-сервисы, автоматизировать и оптимизировать процессы в ГМУ, активно предоставлять доступ к необходимой пользователям информации. Все это способствует повышению прозрачности деятельности органов власти. Цифровые технологии позволяют совершенствовать принятие решений в ГМУ на основе применения аналитических инструментов и методов прогнозирования.

Выводы. Несмотря на выявленные недостатки и проблемы, сделан вывод о том, что в целом перспективы развития в России ЦТ в ГМУ оптимистичны и имеют существенный потенциал.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровизация, цифровые технологии, государственное и муниципальное управление, информационная безопасность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Солопова Н.А., Селезнева Ж.В. Анализ применения цифровых технологий в государственном и муниципальном управлении // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1836–1845. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1836-1845

Автор, ответственный за переписку: Наталья Анатольевна Солопова, ushanovan@mail.ru.

Analysis of the use of digital technologies in state and municipal government

Natalia A. Solopova¹, Zhanna V. Selezneva²

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

² Samara State Technical University; Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issues of digital technologies (DT) application in state and municipal government are analyzed in the article. The progress made in the field of digital transformation of state and municipal government is considered, the main recommendations for the improvement of this process are formulated.

Materials and methods. The theoretical and methodological basis was provided by the scientific works of Russian and foreign scientists devoted to the study of the use of DT in the state and municipal government. Data of Rosstat, Ministry of Digital Development of Russia, abstract and citation database Scopus, as well as the works of Institute for statistical studies and economics of knowledge of National Research University “Higher School of Economics” were used as the materials of the research.

Results. The conducted analysis of the practice of digital technologies application in state and municipal government proved that such technologies are actively used in Russia. Besides, the cost of interaction of citizens and the state in this format is twice as cheap as in the traditional face-to-face format. During the pandemic, the pace of digitalization of the state sector accelerated significantly. Electronic payment systems, open data and government portals, information management systems

and electronic document management can serve as examples of the use of digital technologies in state and municipal government. Digital technologies give the government the opportunity to provide citizens and businesses with various services and online services, to automate and optimize various processes in state and municipal government, to actively provide access to information required by users. All this contributes to increasing the transparency of the activities of the authorities. Digital technologies allow to improve decision-making in state and municipal government through the use of analytical tools and forecasting methods.

Conclusions. Despite the identified shortcomings and problems, it is concluded that, on the whole, the prospects for the development of the use of digital technologies in state and municipal government in Russia is very optimistic and have essential potential.

KEYWORDS: digitalization, digital technologies, public and municipal government, information security

FOR CITATION: Solopova N.A., Selezneva Z.V. Analysis of the use of digital technologies in state and municipal government. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1836-1845. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1836-1845 (rus.).

Corresponding author: Natalia A. Solopova, ushanovan@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение цифровых технологий (ЦТ) в государственном и муниципальном управлении (ГМУ), известном также как электронное правительство (e-government), становится важным аспектом современного административного управления, поскольку предоставляет возможности для повышения эффективности и прозрачности работы государственных и муниципальных организаций. Кроме того, использование ЦТ в деятельности государственных и муниципальных органов управления и предоставление ими соответствующих услуг позволяет физическим и юридическим лицам получить доступ ко всей требующейся им информации и быстро и эффективно получить доступ ко всем услугам [1].

История применения ЦТ в ГМУ насчитывает несколько десятилетий, она связана с продолжительным развитием информационных и коммуникационных технологий:

- 1960–1970 гг. — в первые годы компьютеризации государственно-административных процессов применялись ранние формы вычислительных технологий. Это были системы, разработанные для автоматизации расчетов и обработки данных. Некоторые государственные учреждения и административные службы начали использовать компьютеры для работы с большими объемами информации;

- 1980–1990 гг. — в этот период наблюдалось увеличение использования компьютерных систем в ГМУ. Это в основном были системы учета, обработки заявлений и документооборота. Введение баз данных, компьютерных сетей и клиент-серверных приложений позволило ускорить обработку данных и улучшить эффективность работы государственных органов;

- 2000-е гг. — цифровые технологии начали играть более важную роль в ГМУ. Электронное правительство (e-government) стало активно внедряться во многих странах, что позволило гражданам и предприятиям получать доступ к цифровым услугам, подавать документы и контролировать свою деятельность онлайн;

- 2010-е гг. и по настоящее время — продолжается активное развитие и модернизация систем

электронного управления. Начали широко использоваться облачные технологии, большие данные (big data), искусственный интеллект (AI) и аналитика данных. Это привело к улучшению качества предоставления государственных услуг, повышению эффективности принятия решений в ГМУ и сокращению бюрократии.

Цифровые технологии предоставляют множество возможностей, ранее доступных только в весьма ограниченных объемах. Так, например, применение ЦТ в ГМУ способно создать условия для быстрого и комфортного получения гражданами требуемой информации и услуг. В сущности, ЦТ становятся эффективным инструментом государственного и муниципального управления, помогающим повышать эффективность и качество предоставления информации пользователям.

Органам государственной власти и муниципального самоуправления необходимо поддерживать серьезный контроль за социально-экономическими процессами в целях обеспечения стабильного развития общества. На рис. 1 представлены основные факторы, которые определяют процесс цифровизации отечественного государственного управления.

Среди очевидных преимуществ применения современных ЦТ в деятельности государственных и муниципальных органов власти можно выделить:

- упрощение и сокращение бюрократических процедур;

- значительную экономию времени на обработку документов;

- упрощение координации действий при осуществлении работы государственными и муниципальными служащими;

- обеспечение большей прозрачности в деятельности государственных и муниципальных органов для граждан и соответственно повышение их доверия к государственным и муниципальным структурам.

В настоящий момент в практику российского государственного и муниципального управления внедрен федеральный проект «Цифровое государственное управление», входящий в национальную программу «Цифровая экономика Российской Феде-

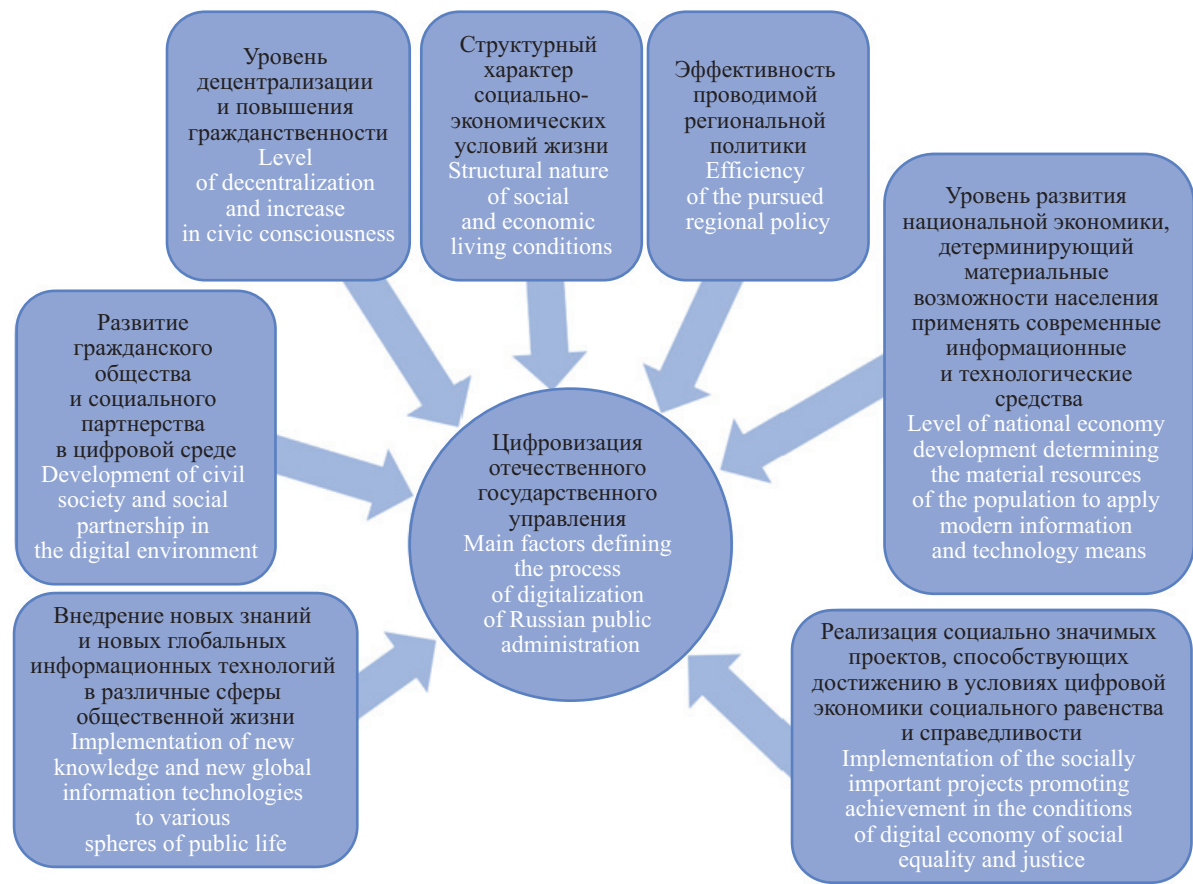


Рис. 1. Основные факторы, определяющие процесс цифровизации российского государственного управления
Fig. 1. Main factors defining the process of digitalization of Russian public administration

рации». В рамках реализации Указов Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», в том числе с целью решения задачи по обеспечению ускоренного внедрения ЦТ в экономике и социальной сфере, Правительством РФ сформирована национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная протоколом заседания президиума Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам от 04.06.2019 № 7¹.

В числе целей названного федерального проекта предусмотрены создание эффективно функционирующей системы управления данными, а также развитие инфраструктуры электронного правительства. При реализации этого проекта к 2024 г. около 70 % всех случаев взаимодействия с гражданами предлагается осуществлять с помощью ЦТ. Также планируется к окончанию срока выполнения федерального проекта обеспечить предоставление всех государственных и муниципальных услуг в элек-

тронном виде и увеличить долю электронного документооборота в государственных и муниципальных органах власти практически до 100 %.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе анализа применения ЦТ в ГМУ использовались следующие материалы и методы: публикации по данной теме, официальные документы и отчеты о выполнении цифровых программ и проектов; проводилось интервью с представителями государственных органов, экспертами и специалистами по цифровым технологиям. Применялись статистические методы анализа данных, сравнительный анализ. С помощью системного анализа осуществлен отбор примеров применения новых технологий в ГМУ, сделано обобщение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный авторами статьи анализ практики применения ЦТ в ГМУ показал, что данные технологии активно используются в России. При этом цифровая форма взаимодействия граждан с государством обходится вдвое дешевле по сравнению с личным (очным) взаимодействием. Оцифровка всех государственных услуг в России, по ожиданиям экспертов, могла бы принести годовую выгоду в размере 4 млрд рублей.

¹ Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». URL: https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/?utm_referrer=https%3a%2f%2findex.ru%2f

Доступные для анализа сведения подтверждают высокие темпы цифровизации российского государственного сектора. Эту тенденцию подтверждают и увеличивающиеся объемы инвестиций, привлекаемых в рассматриваемую сферу. Крупнейшими заказчиками в области цифровизации деятельности выступают Социальный фонд России, Федеральное казначейство, различные министерства и ведомства.

Пандемия привела к ускорению темпов цифровизации в государственном и муниципальном секторе, став для нее важнейшим стимулирующим фактором. Для того чтобы оценить выгоды, получаемые от ЦТ, максимально точно, необходимо определить особенности, присущие деятельности учреждений государственного и муниципального сектора. Эта область отличается сложностью и большими масштабами обрабатываемой и передаваемой информации. Поэтому деятельность в сфере государственного и муниципального управления требует установления разнообразных многоканальных отношений между субъектами. Должностные лица государственных и муниципальных органов власти выполняют различные функции, требующие использования современных автоматизированных средств [2–6].

Практика применения ЦТ в ГМУ развивается по всему миру и включает множество конкретных примеров. Ниже представлены некоторые из них.

1. *Электронная подача документов и заявлений.* Государственные и муниципальные учреждения предоставляют возможность гражданам и предприятиям подавать документы и заявления в электронном формате (налоговые декларации, заявления на получение разрешений или лицензий, заявления в социальные службы и т.д.). Это упрощает процедуру подачи документов, ускоряет обработку и сокращает бумажную работу.

2. *Электронные системы оплаты и финансового учета.* ЦТ применяются для упрощения процессов оплаты государственных услуг, налогов, штрафов и других платежей. Граждане и предприятия могут осуществлять оплату через онлайн-банкинг, электронные кошельки или другие цифровые платежные системы. Это повышает удобство и доступность для пользователей, а также позволяет государственным организациям совершенствовать системы учета и финансового контроля.

3. *Открытые данные и государственные порталы.* Многие муниципалитеты предоставляют доступ к открытым данным на государственных порталах и платформах. На таких порталах можно найти информацию о правительственной деятельности, бюджетах, официальной статистике, проектах и др. Открытые сведения способствуют прозрачности и участию общественности в процессах принятия решений.

4. *Системы управления информацией и электронный документооборот.* ЦТ применяются для организации управления информацией и документо-

оборотом в государственных и муниципальных организациях, что включает создание электронных хранилищ, систем электронного документооборота, автоматическую классификацию и обработку документов. Все это упрощает и ускоряет доступ к информации, повышает эффективность и качество работы.

Это лишь несколько примеров практического использования ЦТ в ГМУ. Конкретные решения и способы внедрения зависят от страны или региона и могут быть адаптированы к конкретным потребностям и задачам управления.

Анализ основных аспектов применения ЦТ в ГМУ выявил следующие преимущества:

1. Цифровые технологии дают возможность правительству предоставлять различные онлайн-сервисы и услуги для граждан и предприятий. Это включает подачу заявлений и документов, онлайн-оплату налогов, получение государственной информации и другие административные процедуры. Такие электронные сервисы упрощают взаимодействие между государством и населением, улучшают доступность услуг и сокращают временные затраты.

2. С помощью ЦТ автоматизируются и оптимизируются процессы в ГМУ. Примеры включают цифровые системы учета, электронный документооборот, системы электронного мониторинга и другие инструменты для автоматизации и ускорения работы государственных и муниципальных органов.

3. Цифровой формат позволяет государственным и муниципальным организациям активно предоставлять доступ к открытым сведениям. Это включает информацию о бюджете, деятельности государственных органов, статистику и другие данные, которые становятся доступными для широкой аудитории. Открытая информация способствует повышению прозрачности деятельности органов власти, дает возможность сторонним разработчикам создавать инновационные решения на основе данных государственных органов и содействует взаимодействию между правительством и гражданами.

4. Цифровые технологии позволяют использовать аналитические инструменты и методы прогнозирования для улучшения принятия решений в ГМУ. Это может включать анализ данных для принятия стратегических решений, моделирование и прогнозирование в области экономики, здравоохранения, транспорта и др.

5. Применение ЦТ играет важную роль в развитии умных городов, где используется широкий спектр решений и инфраструктуры для улучшения качества жизни граждан. Примерами могут быть системы управления транспортом, энергопотреблением, общественные сервисы на основе данных, системы мониторинга окружающей среды и другие цифровые решения, которые способствуют устойчивому развитию городов и эффективному использованию ресурсов.

6. Цифровые технологии предоставляют механизмы для лучшей коммуникации и взаимодействия

между государством и гражданами. Социальные сети, электронные платформы обратной связи, онлайн-консультации и другие инструменты предоставляют возможность гражданам выражать свое мнение, участвовать в принятии решений и получать актуальную информацию от государственных и муниципальных организаций.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что эффективность внедрения ЦТ обеспечивается следующими результатами:

- повышение качества вычислений за счет создания единой информационной базы и централизованной обработки данных;
- обеспечение высокой скорости обработки информации;
- совершенствование процесса предоставления информационных услуг в различных органах ГМУ за счет сокращения времени на составление и получение документов.

Основные эффекты от использования ЦТ в ГМУ представлены на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение ЦТ в ГМУ имеет множество преимуществ, но оно также сопряжено с некоторыми недостатками:

1. Неравенство в доступе к ЦТ может создать разрыв между различными группами населения. Люди, не обладающие достаточными навыками использования технологий или не имеющие доступа к ним, могут быть исключены из электронного

управления и предоставления услуг, что создает потенциальные проблемы социального исключения.

2. Переход к цифровым системам может повлечь за собой проблемы с кибербезопасностью и защитой данных государственных и муниципальных систем. Недостаточные меры безопасности или уязвимость в системах могут привести к утечке конфиденциальной информации, что может нанести ущерб как государству, так и гражданам.

3. Цифровые системы требуют точной и актуальной информации для правильной работы. Ошибки при вводе данных или неполные сведения могут привести к некорректным выводам и принятию неэффективных решений. Поэтому следует обеспечить качество и надежность данных, а также их контроль и проверку.

4. Ситуация, при которой государственные и муниципальные системы полностью зависят от ЦТ, может привести к риску выхода из строя или сбоев в работе. Недоступность или неполадки в системах могут вызвать проблемы в обслуживании граждан и срывы в работе государственных органов.

5. Применение ЦТ в ГМУ требует соответствующих навыков и обучения персонала. Возможны сложности в адаптации сотрудников к использованию новых технологий, что может затруднить успешную реализацию цифровых инноваций.

Разработка и применение ЦТ — довольно дорогостоящий процесс, требующий значительных инвестиций, особенно на начальных этапах цифровизации, а окупаемость инвестиций — медленная.

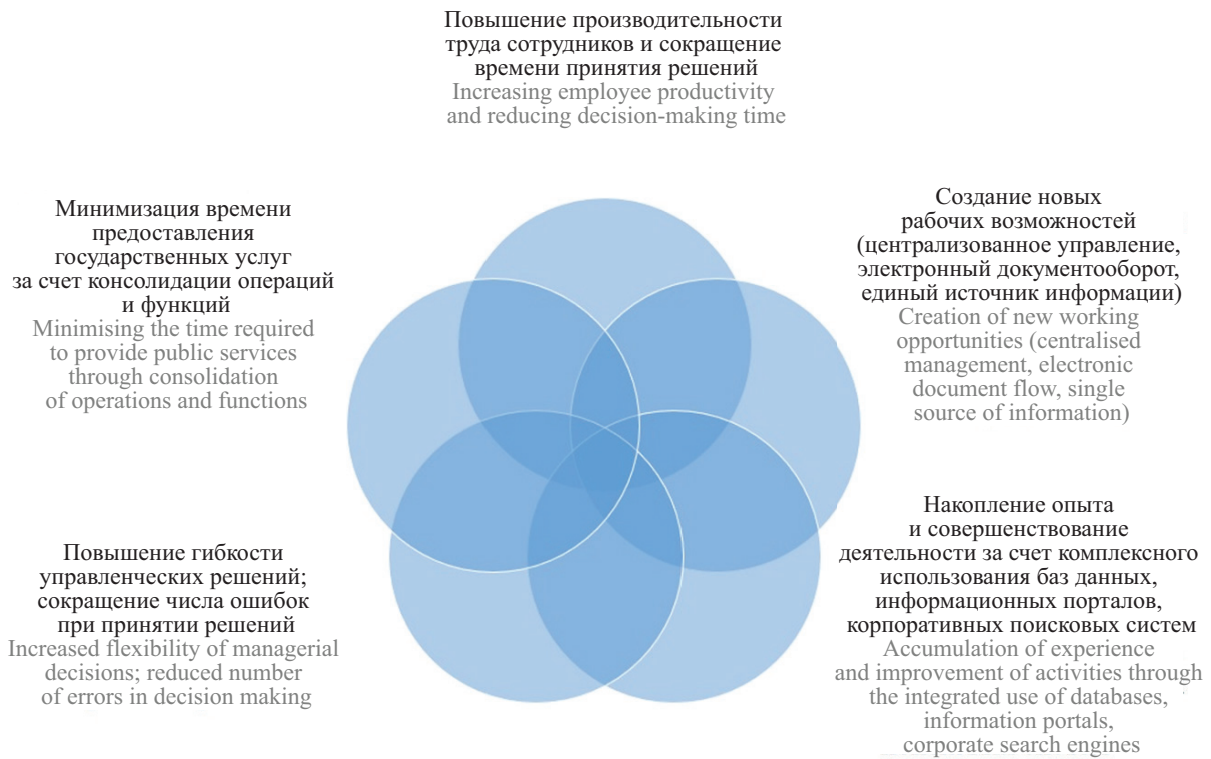


Рис. 2. Основные эффекты от использования цифровых технологий в государственном и муниципальном управлении
Fig. 2. Main effects of the use of digital technologies in state and municipal government

Именно поэтому практически все страны (Россия не исключение) сталкиваются с финансовыми проблемами при внедрении цифровизации в анализируемых сферах. Затраты при применении ЦТ в ГМУ могут варьироваться в зависимости от многих факторов, таких как масштаб проекта, уровень сложности, страна или регион, инфраструктура и необходимые инвестиции в обучение персонала.

Вот некоторые из основных направлений расходов, связанных с применением ЦТ в этой области:

1. Разработка и внедрение цифровых систем включает стоимость разработки и адаптации программного обеспечения (ПО), создание систем хранения и обработки данных, интеграцию существующих систем и развертывание цифровой инфраструктуры.

2. Внедрение ЦТ требует обучения и подготовки персонала для работы с новыми системами и процессами. Это может включать обучение сотрудников учреждений или привлечение специалистов с соответствующими навыками. Расходы на обучение могут быть значительными и содержать стоимость образовательных программ, тренингов и дополнительных ресурсов.

3. Внедрение ЦТ может потребовать обновления или расширения существующей информационной технологической инфраструктуры. Возникает необходимость приобретения нового оборудования, серверов, сетевых устройств и т.д.

4. Цифровые технологии требуют соответствующих мер по обеспечению безопасности данных и защите от возможных угроз. Сюда можно отнести разработку и внедрение мер безопасности, использование шифрования информации, механизмы аутентификации и другие соответствующие действия. Затраты на кибербезопасность могут быть значи-

тельными, особенно для организаций, осуществляющих хранение чувствительных данных. Наша страна по разработкам в области кибербезопасности данных находится на десятом месте в мире. Но, как показывает статистика, уровень киберпреступности увеличивается практически во всех странах, что приводит к необходимости усиления информационной безопасности в деятельности органов ГМУ [7–12]. Поэтому в решении этой проблемы самым перспективным представляется использование технологии распределенного хранения данных (блокчейн).

5. Внедрение ЦТ требует непрерывной поддержки, обслуживания и обновления систем. Это включает управление изменениями, исправление ошибок, обновление ПО и инфраструктуры в соответствии с развивающимися требованиями и технологическими изменениями [13–20].

В целом в нашей стране просматриваются хорошие перспективы развития ЦТ в деятельности государственных и муниципальных органов власти с огромным потенциалом для дальнейшего совершенствования. По данным Росстата, в 2020 г. количество граждан, которые взаимодействовали с органами власти через интернет, особенно тех, кто получал информацию с государственных сайтов, составило 43 % от общей численности населения в возрасте 15–72 лет.

Данные в процентном соотношении о получении населением государственных и муниципальных услуг в электронной форме представлены на рис. 3².

Графики на рис. 3 наглядно демонстрируют ежегодную тенденцию роста доли населения, по-

² Цифровая экономика 2022: краткий статистический сборник. URL: <https://publications.hse.ru/pubs/share/direct/553808040.pdf>

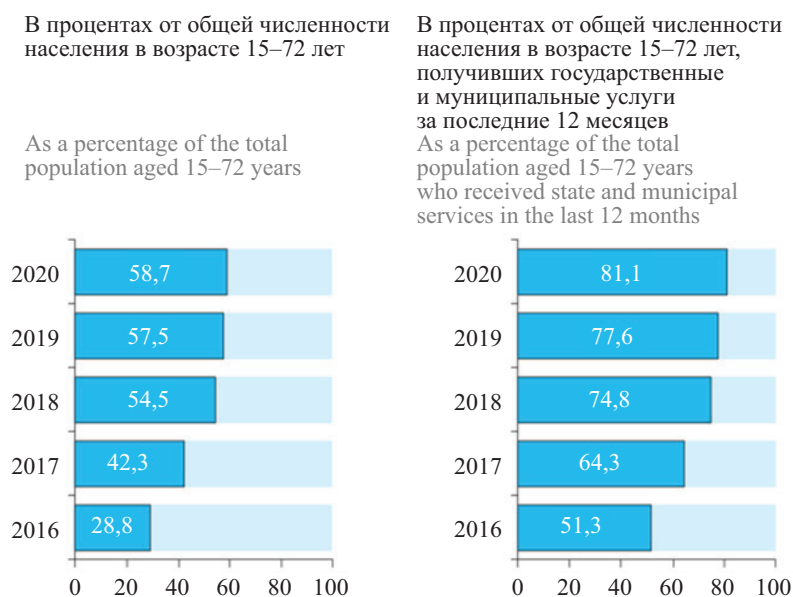


Рис. 3. Получение населением государственных и муниципальных услуг в электронной форме

Fig. 3. Receipt of state and municipal services by the population in electronic form



Рис. 4. Причины отказа населения от получения государственных и муниципальных услуг в электронной форме в 2020 г.
Fig. 4. Reasons for the population's refusal to receive state and municipal services in electronic form in 2020

лучающего государственные и муниципальные услуги. На рис. 4 графически представлена доля лиц в возрасте 15–72 лет, отказавшихся от получения государственных и муниципальных услуг в электронном виде в 2020 г., в процентах от населения в возрасте 15–72 лет, не использовавших интернет для получения государственных и муниципальных услуг в течение последних 12 месяцев².

Основной причиной отказа от получения государственных и муниципальных услуг в электронном виде является желание личного контакта и посещения ведомства.

Планируется дальнейшее развитие информационных систем, предназначенных для предоставления государственных и муниципальных услуг и выполнения государственных функций в цифровой форме.

Представляется, что необходимо разработать более детальные подходы по совершенствованию цифровых информационных процессов в государственных и муниципальных органах управления. Это позволит повысить эффективность деятельности учреждений в рассматриваемой сфере. В качестве дальнейших направлений повышения эффективности применения ЦТ в ГМУ можно предложить продолжить работу по запуску новых цифровых инструментов, сочетающих простоту использования с высокой функциональностью, повышению уровня информационной безопасности, дальнейшей стандартизации цифровых систем и утверждению единых технических стандартов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Обушева К.А. Цифровая трансформация государственного управления // Молодой ученый. 2022. № 20 (415). С. 490–493. EDN WHJSLW.
2. Москвитина Н.В. Цифровая трансформация государственного управления // Социология. 2021. № 4. С. 114–128. EDN PSDDVW.
3. Сухарева М.Н. Цифровая трансформация как приоритетный вектор совершенствования механизма государственного управления // Актуальные проблемы развития государства и права : сб. науч. ст. науч.-практ. круглого стола. 2021. С. 160–162. EDN JPOQJQ.
4. Belyakova O.V. Digital transformation of public administration: achievements and problems // Proceedings of Global Challenges and Prospects of The Modern

Economic Development (GCPMED 2020). 2021. DOI: 10.15405/epsbs.2021.04.02.22

5. Didkovskaya O.V., Guzhova O.A., Acri E.P., Vlasova N.V., Selezneva Zh.V. Urban environment digitalization and its characteristic features within the framework of the project “Smart City” (through the example of Samara) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 775. Issue 1. P. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012011

6. Klochkov Y., Gazizulina A., Golovin N., Glushkova A., Selezneva Zh. Information model-based forecasting of technological process state // 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (Trends and Future Directions) (ICTUS). 2017. DOI: 10.1109/ICTUS.2017.8286099

7. *Vishnivetskaya A., Mikhailova A.* Employment of BIM technologies for residential quarters renovation: global experience and prospects of implementation in Russia // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 497. P. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/497/1/012020

8. *Сибирякова А.И., Тронева А.В., Гурьева Т.Н.* Об использовании информационных технологий в государственном управлении // Вестник Белого генерала. 2020. № 4. С. 48–56. EDN AKXOWG.

9. *Tepeli E., Taillandier F., Breysse D.* Multi-dimensional modelling of complex and strategic construction projects for a more effective risk management // International Journal of Construction Management. 2021. Vol. 21. Issue 12. Pp. 1218–1239. DOI: 10.1080/15623599.2019.1606493

10. *Rezvani A., Khosravi P.* Identification of failure factors in large scale complex projects: an integrative framework and review of emerging themes // International Journal of Project Organisation and Management. 2019. Vol. 11. Issue 1. P. 1. DOI: 10.1504/ijpom.2019.10019953

11. *Veselova N.Y., Bichkova N.P., Aksenova Z.A., Ishchenko O.V., Salii V.V.* Development of the digital economy in the sphere of state and municipal administration in the conditions of innovative technologies and transformation of the national economy // Cooperation and Sustainable Development. 2022. Pp. 1367–1373. DOI: 10.1007/978-3-030-77000-6_158. EDN JQJHKW.

12. *Gavrilova J.A., Kvitsinia N.V., Kalashnikova N.A.* Development of the institute of public procurement in modern Russia: Between blockchain and administration // Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 110. Pp. 388–394. DOI: 10.1007/978-3-030-45913-0_44. EDN BTDOKW.

13. *Novachenko T.V., Bielska T.V., Afonin E.A., Lashkina M.H., Kozhemiakina O.M., Diachenko N.P.* Use of information technology to increase economic efficiency and credibility in public administration in the context of digitization // International Journal of Economics and Business Administration. 2020. Vol. 8.

Issue 1. Pp. 374–382. DOI: 10.35808/ijeba/431. EDN BMUTBU.

14. *Kolesnikov A.V., Channov S.E., Arzhanov V.V., Zaikova S.N.* Strategic Directions to Apply Information Resources in Local Government System // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2022. DOI: 10.15405/epsbs.2022.01.50. EDN GZCHAJ.

15. *Amelin R., Channov S., Polyakova T.* Direct democracy: Prospects for the use of information technology // Communications in Computer and Information Science. 2016. Pp. 258–268. DOI: 10.1007/978-3-319-49700-6_24. EDN YVACAH.

16. *Bousdekis A., Kardaras D.* Digital transformation of local government: A case study from Greece // 2020 IEEE 22nd Conference on Business Informatics (CBI). 2020. DOI: 10.1109/CBI49978.2020.10070. EDN BUXNCU.

17. *Pokachalova E.V., Popov V.V., Bakaeva O.Yu., Razgildieva M.B., Pastushenko E.N.* Modern anti-corruption tools in the sphere of state and municipal finance // Proceedings of the XIV European-Asian “The value of law” (EAC-LAW 2020). 2020. DOI: 10.2991/assehr.k.201205.054. EDN YTXRZS.

18. *Voskresenskaya E., Vorona-Slivinskaya L., Achba L.* Development of public services in the energy field in the age of digital economy // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 110. P. 02031. DOI: 10.1051/e3s-conf/201911002031. EDN NSOYHF.

19. *Goryunova T.I., Goryunova V.V., Kukhtevich I.I.* Modeling of Complexly Structured Reporting Forms and Requests in the Tasks of Automated Provision of Public Services // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2020. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280791. EDN WYTRSE.

20. *Idigova L.M., Markaryan V.R., Mazhiev A.Kh.* Digital technologies in the personnel management system // The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2022. DOI: 10.15405/epsbs.2022.12.69. EDN EUSIMS.

Поступила в редакцию 8 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 27 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Анатольевна Солопова** — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4266-4776, Scopus: 57193075378, ResearcherID: N-8850-2016, ORCID: 0000-0003-2034-4321; ushanovan@mail.ru;

Жанна Владимировна Селезнева — 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; SPIN-код: 5764-0124, Scopus: 518610, ResearcherID: N-8745-2016, ORCID: 0000-0002-8025-5665; sjv-74@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Obusheva K.A. Digital transformation of public administration. *Young Scientist*. 2022; 20(415):490-493. EDN WHJSLW. (rus.).
2. Moskvitina N.V. Digital transformation of public administration. *Sociology*. 2021; 4:114-128. EDN PSDDVW. (rus.).
3. Sukhareva M.N. Digital transformation as a priority vector for improving the mechanism of public administration. *Current problems of development of state and law : collection of scientific articles of the scientific and practical round table*. 2021; 160-162. EDN JPOQJQ. (rus.).
4. Belyakova O.V. Digital Transformation of Public Administration: Achievements and Problems. *Proceedings of Global Challenges and Prospects of The Modern Economic Development (GCPMED 2020)*. 2021. DOI: 10.15405/epsbs.2021.04.02.22
5. Didkovskaya O.V., Guzhova O.A., Acri E.P., Vlasova N.V., Selezneva Zh.V. Urban environment digitalization and its characteristic features within the framework of the project "Smart City" (through the example of Samara). *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 775(1):012011. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012011
6. Klochkov Y., Gazizulina A., Golovin N., Glushkova A., Selezneva Zh. Information model-based forecasting of technological process state. *2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (Trends and Future Directions) (ICTUS)*. 2017. DOI: 10.1109/ICTUS.2017.8286099
7. Vishnivetskaya A., Mikhailova A. Employment of BIM technologies for residential quarters renovation: global experience and prospects of implementation in Russia. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 497:012020. DOI: 10.1088/1757-899X/497/1/012020
8. Sibiryakova A., Troneva A., Gureva T.N. About the using of information technologies in state managing. *White General's Messenger*. 2020; 4:48-56. EDN AKXOWG. (rus.).
9. Tepeli E., Taillandier F., Breysse D. Multidimensional modelling of complex and strategic construction projects for a more effective risk management. *International Journal of Construction Management*. 2021; 21(12):1218-1239. DOI: 10.1080/15623599.2019.1606493
10. Rezvani A., Khosravi P. Identification of failure factors in large scale complex projects: an integrative framework and review of emerging themes. *International Journal of Project Organisation and Management*. 2019; 11(1):1. DOI: 10.1504/ijpom.2019.10019953
11. Veselova N.Y., Bichkova N.P., Aksenova Z.A., Ishchenko O.V., Salii V.V. Development of the Digital Economy in the Sphere of State and Municipal Administration in the Conditions of Innovative Technologies and Transformation of the National Economy. *Cooperation and Sustainable Development*. 2022; 1367-1373. DOI: 10.1007/978-3-030-77000-6_158. EDN JQJHKW.
12. Gavrilova J.A., Kvitsinia N.V., Kalashnikova N.A. Development of the institute of public procurement in modern Russia: Between blockchain and administration. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020; 110:388-394. DOI: 10.1007/978-3-030-45913-0_44. EDN BTDOKW.
13. Novachenko T.V., Bielska T.V., Afonin E.A., Lashkina M.H., Kozhemiakina O.M., Diachenko N.P. Use of information technology to increase economic efficiency and credibility in public administration in the context of digitization. *International Journal of Economics and Business Administration*. 2020; 8(1):374-382. DOI: 10.35808/ijeba/431. EDN BMUTBU.
14. Kolesnikov A.V., Channov S.E., Arzhanov V.V., Zaikova S.N. Strategic directions to apply information resources in local government system. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2022. DOI: 10.15405/epsbs.2022.01.50. EDN GZCHAJ.
15. Amelin R., Channov S., Polyakova T. Direct democracy: Prospects for the use of information technology. *Communications in Computer and Information Science*. 2016; 258-268. DOI: 10.1007/978-3-319-49700-6_24. EDN YVACAH.
16. Bousdekis A., Kardaras D. Digital transformation of local government: A case study from Greece. *2020 IEEE 22nd Conference on Business Informatics (CBI)*. 2020. DOI: 10.1109/CBI49978.2020.10070. EDN BUXNCU.
17. Pokachalova E.V., Popov V.V., Bakaeva O.Yu., Razgildieva M.B., Pastushenko E.N. Modern anti-corruption tools in the sphere of state and municipal finance. *Proceedings of the XIV European-Asian "The value of law" (EAC-LAW 2020)*. 2020. DOI: 10.2991/assehr.k.201205.054. EDN YTXRZS.
18. Voskresenskaya E., Vorona-Slivinskaya L., Achba L. Development of public services in the energy field in the age of digital economy. *E3S Web of Conferences*. 2019; 110:02031. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002031. EDN NSOYHF.
19. Goryunova T.I., Goryunova V.V., Kukhtevich I.I. Modeling of complexly structured reporting forms and requests in the tasks of automated provision of public services. *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2020. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280791. EDN WYTRSE.
20. Idigova L.M., Markaryan V.R., Mazhiev A.Kh. Digital technologies in the personnel management system. *The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2022. DOI: 10.15405/epsbs.2022.12.69. EDN EUSIMS.

Received September 8, 2023.

Adopted in revised form on October 27, 2023.

Approved for publication on October 27, 2023.

B I O N O T E S: **Natalia A. Solopova** — Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4266-4776, Scopus: 57193075378, ResearcherID: N-8850-2016, ORCID: 0000-0003-2034-4321; ushanovan@mail.ru;

Zhanna V. Selezneva — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor Department of Cost Engineering and Technical Expertise of Buildings and Structures; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 5764-0124, Scopus: 518610, ResearcherID: N-8745-2016, ORCID: 0000-0002-8025-5665; sjv-74@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.*

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 аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

КБК000000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2023 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

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

03214643000000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

КБК000000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2023 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 _____

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/>



