

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 1
2025**

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

Сквозной номер 194

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 1
2025**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	29.01.2025.
Подписан в свет	31.01.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,02. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 23

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	31.01.2025

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva* **Corrector:** *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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. Майя, А.И. Финогенов
Интегрированные типы производственных зданий на основе использования солнечной энергии для условий Сирии 11

Л.А. Банникова, В.А. Ларионова
Применение кластерного анализа для определения характера использования участка улицы 20

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

В.В. Долгушева, А.М. Ибрагимов
Экспериментальное и численное сравнение напряженно-деформированного состояния арки и комбинированной арочной конструкции 37

Б.Ш. Умаров, Т.А. Зиннуров
Изучение потерь напряжения в стеклопластиковой арматуре при релаксации и ползучести 50

И.Э. Файзуллин, Л.С. Ляхович, П.А. Акимов, З.Р. Галяутдинов, А.С. Пляскин
Формирование расчетных схем групповых прицельных связей для некоторых упругих систем 60

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Д.Ю. Небратенко, А.Н. Жемерикин, Д.И. Лямкин
Исследование свойств крупнотоннажных продуктов лесохимии как пластификаторов дорожных битумов 73

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

М.М. Уткин, Т.А. Уткина
Количественная оценка суффозионной устойчивости доломитовой муки при карстологическом прогнозе 84

И.Г. Кантаржи, А.Г. Гогин, Ж.И. Нагорнова
Нормативные методы и численное моделирование при определении параметров расчетных волн для портовых гидротехнических сооружений 95

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Е.Г. Малявина, М.И. Урядов
Оценка круглосуточного теплового режима жилого помещения в теплый период года в г. Москве 108

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Р. Булина, Н.А. Солопова
Влияние цифровых технологий на бизнес-модели промышленных предприятий строительной индустрии 119

С.Б. Сборщиков, Н.В. Лазарева, Д.М. Лейбман
Диссипативные структуры в системе управления отраслевыми научно-производственными комплексами 133

Требования к оформлению научной статьи 145

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Ahmad Maya, Alexsander I. Finogenov

Integrated types of industrial buildings based on the use of solar energy for Syrian conditions 11

Larisa A. Bannikova, Viola A. Larionova

Application of cluster analysis to determine the pattern of use of a street section 20

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

Vera V. Dolgusheva, Alexander M. Ibragimov

Experimental and numerical comparison of the stress-strain state of an arch and a combined arch structure. 37

Bulat Sh. Umarov, Tagir A. Zinnurov

Study of stress loss in fibreglass reinforcement under relaxation and creep 50

Irek E. Faizullin, Leonid S. Lyakhovich, Pavel A. Akimov, Zaur R. Galautdinov, Andrey S. Plyaskin

Development of computational schemes of group targeted connections for some elastic systems 60

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Dmitry Yu. Nebratenko, Alexander N. Zhemerikin, Dmitry I. Lyamkin

Investigation of the properties of large-tonnage products of forest chemistry as plasticizers of road bitumen 73

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Mikhail M. Utkin, Tatyana A. Utkina

Quantitative assessment of dolomite powder suffusion resistance in karstological prognosis 84

Izmail G. Kantarshi, Alexander G. Gogin, Zhanna I. Nagornova

Normative methods and numerical modelling in determining the design waves for port hydraulic structures 95

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Elena G. Malyavina, Maksim I. Uryadov

Evaluation of the 24-hour thermal conditions of a dwelling room in the warm period of the year in Moscow 108

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Anna R. Bulina, Natalia A. Solopova

Impact of digital technologies on the business models of construction industry enterprises. 119

Sergej B. Sborshchikov, Natal'ya V. Lazareva, Dmitrij M. Lejbman

Dissipative structures in the management system of industrial research and production complexes 133

Requirements for research paper design 145

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 1, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 1, 2025

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).

Интегрированные типы производственных зданий на основе использования солнечной энергии для условий Сирии

Ахмад Майя, Александр Иванович Финогенов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается актуальная проблема, связанная с развитием промышленного потенциала городов Сирии. С учетом географического размещения страны в условиях жаркого климата предлагается широкое использование воспроизводимых источников солнечной энергии с применением высокоэффективных энергогенерирующих устройств в виде параболических солнечных концентраторов. Изложены результаты исследований по формированию энергоэффективных производственных зданий с интеграцией в их структуре солнечных концентраторов, системно размещаемых в верхнем пространстве зданий над покрытием.

Материалы и методы. Принципиальная возможность использования энергогенерирующих солнечных концентраторов проиллюстрирована на основе вариантного анализа возможных приемов конструктивного размещения и ориентации энергетических модулей для различных типов производственных зданий. Новые решения показаны как для условий конструктивно независимого опирания систем наружных энергетических модулей, так и для условий их частичного или полного опирания на конструкции каркаса производственного здания.

Результаты. Рекомендованные новые решения обеспечивают энергетическую автономность предприятия, возможность гибкого, компактного и независимого размещения энергогенерирующих устройств в условиях существующей производственной застройки, а также при совершенствовании и модернизации производственных зданий.

Выводы. Предлагаемые решения по формированию новых энергоэффективных типов производственных зданий на основе активного использования солнечной энергии рекомендуются к широкому практическому применению, что обеспечит условия устойчивого развития промышленных центров в городах Сирии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: солнечная энергия, производственные здания, солнечные концентраторы, энергогенерирующие устройства, планировочная структура, интегрированные решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Майя А., Финогенов А.И. Интегрированные типы производственных зданий на основе использования солнечной энергии для условий Сирии // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 11–19. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.11-19

Автор, ответственный за переписку: Александр Иванович Финогенов, finogenov45@mail.ru.

Integrated types of industrial buildings based on the use of solar energy for Syrian conditions

Ahmad Maya, Aleksander I. Finogenov

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

ABSTRACT

Introduction. The paper reflects an important problem related to the development of industrial potential of Syrian cities. Taking into account the geographical location of the country in hot climate conditions, it is proposed to widely use renewable sources of solar energy, using highly efficient energy-generating devices in the form of parabolic solar concentrators. The results of research on the formation of energy-efficient industrial buildings with the integration of solar concentrators in their structure, systematically placed in the upper space of buildings above the roof, are presented.

Materials and methods. The fundamental possibility of using energy-generating solar concentrators is illustrated in the paper based on a variant analysis of possible methods of constructive placement and orientation of energy modules for various types of industrial buildings. New solutions are shown both for conditions of structurally independent support of external energy module systems and for conditions of their partial or complete support on the frame structures of an industrial building.

Results. The recommended new solutions provide energy autonomy of the enterprise, the possibility of flexible, compact and independent placement of energy-generating devices in the conditions of the existing industrial development, as well as in the conditions of improvement and modernization of industrial buildings.

Conclusions. The proposed solutions for the formation of new energy-efficient types of industrial buildings based on the active use of solar energy are recommended for wide practical application, which will provide conditions for the sustainable development of industrial centres in the cities of Syria.

KEYWORDS: solar energy, industrial buildings, solar concentrators, energy-generating devices, planning structure, integrated solutions

FOR CITATION: Maya A., Finogenov A.I. Integrated types of industrial buildings based on the use of solar energy for Syrian conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):11-19. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.11-19 (rus.).

Corresponding author: Aleksander I. Finogenov, finogenov45@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важными направлениями в проектировании промышленных предприятий являются требования роста экономической эффективности и снижения материалоемкости промышленных объектов [1]. Однако в мировой практике, ориентированной на устойчивое развитие, все большее значение приобретают требования по сокращению энергопотребления, повышению энергоэффективных качеств зданий и сооружений [2]. Один из перспективных методов разрешения этой задачи — использование в проектных решениях альтернативных источников энергии [1]. Эти тенденции во многом определены уменьшением мировых запасов традиционных топливных ресурсов, увеличением их стоимости и негативной динамикой состояния природной среды, обусловленной сжиганием углеводородного топлива [3]. Таким образом, в промышленных отраслях ключевой тенденцией станет ориентация проектной и строительной практики на применение возобновляемых природных источников энергии при сокращении объемов использования ископаемых видов топлива [4].

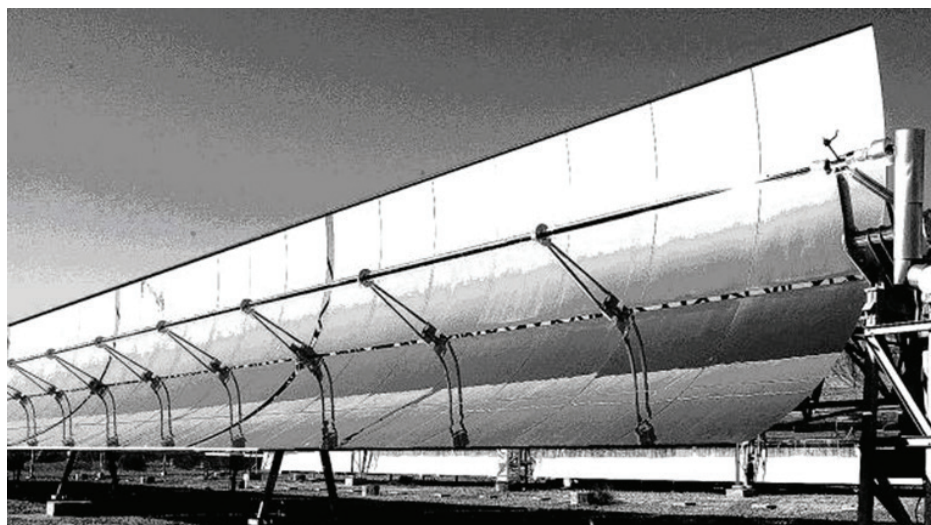
В настоящее время практика показывает различные направления в выборе и использовании альтернативных источников энергии, таких как геотермальное тепло, энергия ветра, воды и солнца. Эффективность их применения в промышленном строительстве будет во многом определяться географическим размещением объектов строительства, их отраслевым назначением, а также конкретными архитектурно-типологическими решениями зданий и сооружений.

Современные исследования указывают на значительный потенциал в использовании источников солнечной энергии в странах с устойчивым жарким климатом. В рассматриваемых природно-географических условиях Сирии, характеризующихся высокой интенсивностью солнечной радиации, применение солнечных энергогенерирующих устройств служит наиболее эффективным направлением в энергообеспечении городов и их промышленных центров [5]. Сегодня эти решения особенно актуальны, учитывая негативные экономические последствия послевоенного периода в Сирии и необходимость форсированного воспроизводства в этой стране собственных энергетических ресурсов [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Производство энергетических ресурсов станет основным направлением для современной экономики Сирийской Арабской Республики и развития ее промышленного потенциала. Определяющими предпосылками для такого развития являются особенности географических и климатических факторов в размещении страны. По своему географическому положению территория Сирии прилегает к экваториальной зоне, где количество солнечных дней составляет максимальную часть годового периода, при этом количество солнечных часов имеет значения 2700–3700. Среднегодовой уровень солнечной радиации достигает весьма высоких значений и составляет 700–2000 Вт/м², что в сравнении с другими странами обуславливает особую эффективность использования энергии солнца как основного источника возобновляемой энергии [6].

Практика показывает, что одно из перспективных направлений в использовании солнечных энергогенерирующих устройств — применение солнечных параболических концентраторов. Солнечные концентраторы — это технические устройства, которые концентрируют интенсивность солнечного излучения при помощи продольных сферических зеркальных отражающих поверхностей для разогрева и преобразования циркулирующего теплоносителя в пар высокого давления с последующим преобразованием этой тепловой энергии в электропаротурбинных установках. Параболические концентраторы характеризуются наибольшей энергоэффективностью по сравнению с солнечными плоскостными батареями и солнечными коллекторами. Более того, как показывает практика, использование этих устройств обеспечивает возможность их упорядоченного компактного плоскостного размещения и монтажа [7]. Таким образом, солнечные концентраторы могут быть интегрированы в структуру производственного здания, например, во внешнем пространстве плоскости покрытия. Данное решение, по мнению авторов, является наиболее целесообразным, учитывая архитектурную типологию промышленных зданий, значительную площадь наружных поверхностей покрытий, обеспечивающих возможность пространственно компактного многорядного размещения систем солнечных энергогенерирующих устройств. Кроме того, предлагаемая компоновка позволяет эффективно использовать фактическую площадь застройки промышленного здания, не занимая при этом допол-



Энергогенерирующий параболический солнечный концентратор, рекомендуемый для применения в климатических условиях Сирии

Energy-generating parabolic solar concentrator recommended for use in the climatic conditions of Syria

нительных земельных территорий в границах участков производственной застройки (рис.).

В этой связи важным последующим направлением станет изучение приемов рационального интегрирования солнечных энергогенераторов с планировочной и конструктивной структурой конкретных производственных зданий, используя их изначальную конструктивную жесткость, а также большие плоскостные поверхности наружных кровельных покрытий для размещения на них энергогенерирующих устройств.

Наряду с этим актуальной представляется задача выбора оптимальной планировочной ориентации размещаемых систем параболических солнечных концентраторов, конструктивно интегрируемых в пространстве покрытия зданий, по отношению к потоку солнечной радиации. Следует также учитывать неравномерность поступления радиационных потоков в зависимости от объективных сезонных изменений положения солнца по отношению к земной поверхности. В то же время, как показывает анализ, жесткая привязка пространственной структуры концентраторов к конструктивной основе промышленного здания-аналога может изначально не соответствовать выбору эффективного направления на солнечный источник [7, 8].

Эти особенности послужили основой для проведения комплексных исследований по выбору и разработке новых приемов независимого энергетически эффективного размещения солнечных концентраторов, обеспечивающих конструктивно гибкие способы их компоновки для различных условий конкретного планировочного размещения и конфигурации профиля производственного здания, используемого в качестве исходной конструктивной базовой основы.

В ходе исследования рассмотрены и проработаны различные приемы размещения систем солнечных

концентраторов, а именно: стационарно размещаемые на плоскости покрытия здания и конструктивно привязанные к направлению его планировочных осей; с независимой осевой ориентацией концентраторов на плоскости покрытия здания для выбора их энергетически эффективного направления. В основе других вариантов были приняты решения по размещению концентраторов с независимой наклонной или вертикальной ориентацией их монтажной плоскости по отношению к конструктивным планировочным осям базового производственного здания. В ряде случаев проработаны решения по полному выносу верхней монтажной плоскости крепления концентраторов за пределы здания с частичным опиранием ее на конструкции крайнего ряда колонн каркаса здания.

Предлагаемые приемы размещения и монтажа интегрированных солнечных установок учитывают различные ситуации развития промышленной застройки производственной зоны города: они могут монтироваться в структуре уже существующего здания, устанавливаться на зданиях, находящихся в процессе строительной реконструкции, или предусматриваться в составе вновь проектируемого энергоинтегрированного производственного здания. В каждом случае для проработки таких принципиальных решений требуется совместное участие конструкторов, архитекторов и технологов. Кроме того, формирование таких энергоинтегрированных зданий определяет новые возможности в создании выразительных архитектурно-композиционных решений производственных объектов [9, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью формирования эффективных приемов интеграции солнечных энергогенерирующих

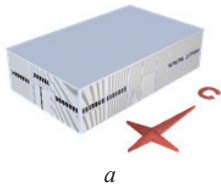
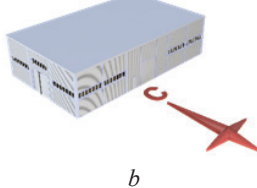
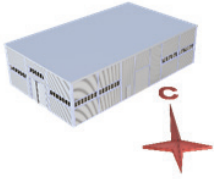
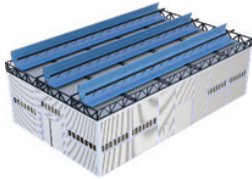
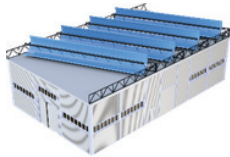
устройств в структуру производственных зданий в составе исследований предусмотрены варианты проектные проработки по их адаптации. В основу типологии размещения солнечных концентраторов параболического типа положен прием их интегрированного многорядного плоскостного расположения в конструктивной системе промышленного здания с частичным или полным использованием его верхнего пространства над покрытием [11, 12]. При таком размещении важно учитывать оптимальную планировочную ориентацию и угол наклона зеркал для обеспечения максимальной эффективности в утилизации солнечного излучения, его последующего преобразования в энергию пара и конечного производства электроэнергии [13–16].

В процессе исследований были проработаны основные принципиальные варианты пространственного размещения и ориентации солнечных энергетических устройств применительно к поверхностям условно выбранного экспериментального типа производственного здания-аналога. Вариантные решения предусматривают формирование единой многорядной структуры продольных параболических зеркал. Крепление протяженных зеркальных поверхностей в одних вариантах предполагает использование неза-

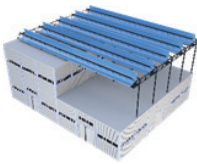
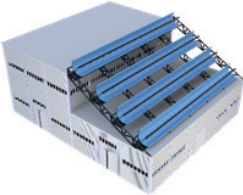
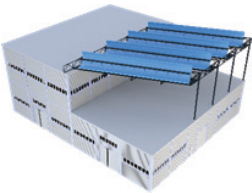
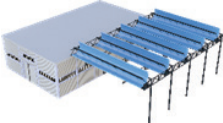
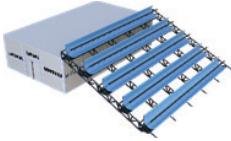
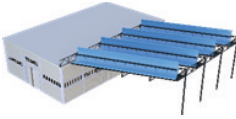
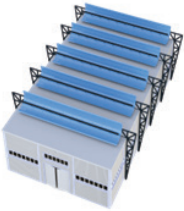
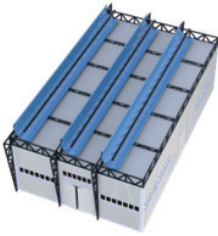
висимых большепролетных металлических конструкций с их периметральным опиранием на внешний каркас производственного здания. В других вариантах проработаны решения с частичным односторонним примыканием большепролетных конструкций концентраторов с их опиранием на колонны внешнего стенового каркаса здания. В ряде вариантов предусмотрено частично независимое самостоятельное опирание пространственных систем энергетических модулей за пределами стен корпуса здания-аналога. Системный вариантный анализ предложенных решений представлен в графической табл. 1.

Как видно из табл. 1, требования по выбору оптимальной направленности элементов солнечных энергетических устройств, представленных в виде единого пространственного модуля, являются определяющими в формировании энергоинтегрированного производственного объекта. Таблица иллюстрирует четыре принципиальные группы вариантов графических схем в качестве наиболее возможных практических ситуаций размещения полей концентраторов при формировании конкретного исходного энергоэффективного здания-аналога, а именно: однопролетное или многопролетное здание с единой высотой покрытия; производственное здание с разной

Табл. 1. Сравнительная таблица вариантов экспериментальных исследований по выбору возможных схем совместной интегрированной компоновки производственного здания и конструктивной системы солнечного энергетического модуля
Table 1. Comparative table of options for experimental studies on the selection of possible schemes for a joint integrated layout of a production building and a structural system of a solar energy module

Варианты возможного размещения и ориентации производственного здания по отношению к географическим координатам Options for possible location and orientation of the production building in relation to geographic coordinates			
1. Приемы оптимального размещения систем солнечных концентраторов при разнонаправленной фактической осевой ориентации производственного здания / Techniques for optimal placement of solar concentrator systems in case of different actual axial orientation of a production building	 Схема 1 / Scheme 1	 Схема 2 / Scheme 2	 Схема 3 / Scheme 3

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

2. Приемы оптимального размещения систем солнечных концентраторов в зданиях с различными высотами технологических пролетов Techniques for optimal placement of solar concentrator systems in buildings with different heights of technological spans	 Схема 4 / Scheme 4	 Схема 5 / Scheme 5	 Схема 6 / Scheme 6
3. Приемы размещения солнечных концентраторов с односторонним независимым примыканием к фасадной плоскости производственного здания / Solar concentrators with one-sided independent connection to the facade plane of a production building	 Схема 7 / Scheme 7	 Схема 8 / Scheme 8	 Схема 9 / Scheme 9
4. Приемы размещения системы солнечных концентраторов с независимым полным опиранием их на дополнительные конструктивные опоры за пределами стен здания-аналога Methods of placing the solar concentrator system with independent full support on additional structural supports outside the walls of the analogue building	 Схема 10 / Scheme 10	 Схема 11 / Scheme 11	 Схема 12 / Scheme 12

высотой смежных пролетов; использование смежного прищехового пространства с частичным продольным конструктивным опиранием пространственного энергетического модуля на каркас здания; независимое периметральное опирание энергетического модуля с выносом опорных конструкций его несущего каркаса за пределы каркаса здания.

Каждая принципиальная группа вариантов, представленных в табл. 1, требует конкретной оценки реальной ситуации размещения производственного здания, определения потенциальной возмож-

ности максимального применения существующего пространства покрытия здания, а также возможности использования несущих конструкций его каркаса для опирания и выбора оптимальной ориентации большепролетных конструкций пространственного энергетического модуля. Данные приемы отражены в схемах по варианту 1.

В случае недостаточной площади пространства верхнего покрытия, например при однопролетном типе здания, целесообразно использование приемов в соответствии со схемами по варианту 3 — с ча-

стичным выносом конструкций энергетического поля концентраторов за пределы здания в пространство смежной прицеховой территории. При такой компоновке конструктивная система концентраторов может предусматривать существенное расширение полезного энергетического пространства, при этом будет частично опираться на дополнительные наружные опоры.

Аналогичный вариант с использованием дополнительных опорных конструкций показан также на примере схем по варианту 2 (табл. 1), где энергетическое поле концентраторов полностью размещается в планировочной структуре производственного здания, имеющего значительные перепады высот смежных технологических пролетов.

Следует отметить, что при общем рассмотрении вариантов использования различных приемов размещения интегрированных энергосистем важным принципиальным фактором является также оценка типов применяемых строительных конструкций в конкретном здании-аналоге, а именно: применение стального или железобетонного каркаса, а также смешанного использования каркасных и стеновых конструкций. В случаях недостаточной несущей способности каркаса конкретного здания-аналога конструктивное решение пространственной энергетической системы целесообразно выполнять в виде независимой большепролетной металлической рамной конструкции с выносом конструкций опор за пределы периметра здания, что показано на схемах в составе варианта 4 (см. табл. 1, вариант 4, схемы 10–12) [17, 18].

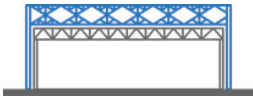
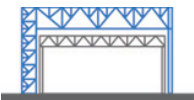
Предложенные принципиальные приемы, как правило, не требуют изменений в основной структуре здания и позволяют разместить солнечные концентраторы в оптимальном эффективном положении. Бо-

лее того, использование конструктивно независимых большепролетных рамных конструкций может применяться в случаях сложного конструктивного профиля здания, в схемах с неодинаковой протяженностью пролетов или в случаях принятия принципиального проектного решения по сохранению существующей конструктивной схемы здания в неизменяемом состоянии.

Другим принципиальным направлением в исследовании энергоинтегрированных систем стали варианты планировочных и конструктивных схем с применением большепролетных опорных рамных конструкций для крепления параболических зеркал, обеспечивающих высокую конструктивную прочность, полную независимость компоновки энергетического поля концентраторов от конфигурации поперечного профиля производственного здания-аналога и эффективность пространственной ориентации энергетического модуля на солнечный источник. Данные решения представлены в табл. 2. В отличие от схем 10–12 по варианту 4 (см. табл. 1) решения, показанные в табл. 2, целесообразны для применения в случаях сложного поперечного профиля производственного здания-аналога (наличия элементов светоаэрационных фонарей, высоких пролетов-вставок или дополнительных пристроек к основному зданию), а также в случаях использования в основном здании облегченных конструкций несущего каркаса.

Таким образом, использование независимых большепролетных металлических рамных конструкций обеспечивает выбор оптимальной продольной, поперечной или диагональной компоновки элементов солнечных концентраторов, а также полную независимость пространственной надстройки от конкретной схемы плана и поперечного профиля производственного здания-аналога [18–21].

Табл. 2. Варианты применения большепролетных опорных рамных конструкций как принципиального приема в обеспечении конструктивно независимого основания для размещения элементов пространственного энергетического модуля
Table 2. Variants of application of large-span support frame structures as a principle technique in providing a structurally independent base for placing the elements of the spatial energy module

		
Схема 1. Сплошная рама Scheme 1. Solid frame	Схема 2. Рама с жесткими стойками Scheme 2. Frame with rigid struts	Схема 3. Двухконсольная рама Scheme 3. Double cantilever frame
		
Схема 4. Сквозная рама с гибкими стойками Scheme 4. Lattice frame with flexible struts	Схема 5. Двухшарнирная рама Scheme 5. Double hinged frame	Схема 6. Одноконсольная рама Scheme 6. Single cantilever frame
		
Схема 7. Рама с одной гибкой стойкой Scheme 7. Frame with one flexible strut	Схема 8. Рама с наружными подкосами Scheme 8. Frame with external struts	Схема 9. Консольная рама Scheme 9. Cantilever frame

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показана важность использования воспроизводимых природных источников энергии для обеспечения перспективного развития отраслевых объектов промышленности на территории Сирийской Арабской Республики. Как показывает климатогеографический анализ, важнейшим энергетическим ресурсом для такого развития в условиях размещения Сирии является использование энергии солнечного излучения.

Результатами исследования обоснована целесообразность использования энергогенерирующих источников на основе широкого применения устройств в виде параболических типов солнечных концентраторов. Представлена концепция формирования энергоавтономных производственных зданий с интеграцией в их структуре солнечных энергогенерирующих систем в виде пространственно развитых установок солнечных концентраторов.

Важной особенностью предлагаемых решений является их компактное размещение в пределах планировочной структуры конкретного модернизируемого производственного здания без использования дополнительных земельных территорий. Кроме того,

предлагаемая интегрированная компоновка пространственных энергетических модулей обеспечивает практическую возможность их планировочной организации в виде любой независимой схемы для обеспечения оптимальной планировочной ориентации концентраторов с учетом суточного движения солнца.

Рекомендованы принципиальные решения по эффективному размещению этих устройств с максимальным использованием планировочного пространства над покрытием существующих зданий. Представлены принципиальные приемы размещения пространственных энергетических модулей в виде систематизированных вариантов их планировочных и конструктивных решений. Предлагаемые приемы конструктивного размещения встраиваемых энергогенерирующих устройств учитывают возможность их размещения в структуре зданий с различным количеством пролетов, различным поперечным профилем и типами несущих конструкций.

Практической ценностью этих решений является возможность использования и модернизации существующих промышленных зданий, размещающихся в производственных центрах сирийских городов, в целях их автономного энергообеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильвицкая С.В., Поляков И.А. Этапы развития архитектуры и природы как единой системы // Естественные и технические науки. 2014. № 11–12 (78). С. 443–444. EDN TJVVUJ.
2. Корниенко С.В. Энергоэффективное производственное здание. Какое оно? // Энергосбережение. 2019. № 2. С. 38–41. EDN YZSKMX.
3. Фисенко А.А., Бассе М.Е. Энергоэффективность промышленной архитектуры: Современная теория и практика // Архитектура и современные информационные технологии. 2013. № 2 (23). С. 13. EDN QAOVCV.
4. Баринова В.А., Ланьшина Т.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире // Российское предпринимательство. 2016. Т. 17. № 2. С. 259–270. DOI: 10.18334/rp.17.2.2214. EDN VOCHOV.
5. Бутко В.Н., Украинец М.С. Состояние и мировые перспективы развития солнечной электроэнергетики // Вестник науки Костанайского социально-технического университета имени академика З. Алдамжар. 2012. № 3. С. 49–57.
6. ضارعتسلا، يلودل انواعتل او طيختل ائيه، قمدتسلا ائيمتل افاده ن لوالا يوطلا ينطول، اارزولا سلجم قسائر: فيروسلا فيبرعلا فيرومجل [Орган планирования и международного сотрудничества // Первый национальный добровольный обзор по целям устойчивого развития. Сирийская Арабская Республика : Администрация Совета Министров, 2020. 85 с.]. URL: file:///D:/PHD/عج ارم/_2020_Syria_Report_Arabic.pdf
7. Li G., Xuan Q., Akram M.W., Akhlaghi Y.G., Liu H., Shittu S. Building integrated solar concentrating systems : a review // Applied Energy. 2020. Vol. 260. P. 114288. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114288
8. Good C., Chen J., Dai Y., Hestnes A.G. Hybrid photovoltaic-thermal systems in buildings : a review // Energy Procedia. 2015. Vol. 70. Pp. 683–690. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.176
9. Николаева И.О. Особенности интеграции фотоэлектрических установок в архитектуру зданий (на примере научно-производственных комплексов) // Архитектура и современные информационные технологии. 2023. № 2 (63). С. 115–129. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-115-129. EDN VZDYPK.
10. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л. : Наука : Ленингр. отд-ние, 1989. 308 с.
11. Cappelletti A., Nelli L.C., Reatti A. Integration and architectural issues of a photovoltaic/thermal linear solar concentrator // Solar Energy. 2018. Vol. 169. Pp. 362–373. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.013
12. Cappelletti A., Catelani M., Ciani L., Kazimierzczuk M.K., Reatti A. Practical issues and characterization of a photovoltaic/thermal linear focus 20X solar concentrator // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Pp. 2464–2475. DOI: 10.1109/TIM.2016.2588638

13. Подковальников С.В., Поломошина М.А. Интеграция возобновляемых источников энергии в систему электроснабжения промышленного предприятия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 11 (142). С. 182–198. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-182-198. EDN YPWUJF.

14. Поляков И.А., Ильвицкая С.В. Использование средств альтернативной энергетики при формировании художественного образа в архитектуре // Архитектура и современные информационные технологии. 2017. № 1 (38). С. 160–173. EDN YGIKZV.

15. Семикин П.П. Принципы формирования архитектуры высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии : дис. ... канд. арх. М., 2014. С. 40–41. EDN FPOSSO.

16. Чесноков С.А., Чесноков А.Г., Прилипко С.Г. Использование тонкопленочных солнечных модулей в архитектуре // ОАО «ГИС». 2014.

17. Бузало Н.А., Пономарев Р.Р. Типовые решения производственных зданий с металлическим

каркасом, построенных в советский период // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений : мат. 18-й Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 9–14. EDN TOUCPZ.

18. Финогенов А.И. Интегрированные типы промышленных зданий с использованием ветроэнергетических установок // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 2. С. 36–42. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.02.36-42. EDN CSLLNW.

19. Androulopoulos A., Drosou V., Christodoulaki R., Rovira A.J., Enríquez J., Abbas R. et al. Energy saving in industrial buildings using advanced concentrated solar thermal systems // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1196. Issue 1. P. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/1196/1/012024

20. Parthiv K., Turchi C. Initial Investigation into the Potential of CSP Industrial Process Heat for the Southwest United States. National Renewable Energy Laboratory, 2015.

21. Дятков С.В., Михеев А.П. Архитектура промышленных зданий. М. : Изд-во АСВ, 2008. 550 с.

Поступила в редакцию 4 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Ахмад Майя — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; may.aahmad8877@gmail.com;

Александр Иванович Финогенов — кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры Института архитектуры и градостроительства, старший научный сотрудник; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5969-0492, Scopus: 57200279286, ORCID: 0000-0003-2835-599X; finogenov45@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ilvitskaya S.V., Polyakov I.A. Stages of development of architecture and nature as a single system. *Natural and Technical Sciences*. 2014; 11-12(78):443-444. EDN TJVVUJ. (rus.).

2. Kornienko S.V. Energy-efficient industrial building. What is it? *Energy Saving*. 2019; 2:38-41. EDN YZSKMX. (rus.).

3. Fisenko A.A., Basse M.E. Energy efficiency of industrial architecture: Modern theory and practice. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2013; 2(23):13. EDN QAOVCV. (rus.).

4. Barinova V.A., Lanshina T.A. Development of renewable energy sources in Russia and in the world. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2016; 17(2): 259-270. DOI: 10.18334/rp.17.2.2214. EDN VOCHOB. (rus.).

5. Butko V.N., Ukrainets M.S. Status and world prospects for the development of solar power engineer-

ing. *Bulletin of Science of the Kostanay Social and Technical University named after Academician Z. Aldamzhar*. 2012; 3:49-57.

6. ضارعت سال، يلودل نواعتل او طيختل ائيه. تيرومجل، تمادتس مل ائيمتل فادما ن ع لوالا ي عوطلا ين طولا ءارزولا سل جم قساىر: تيروسلا ءيبر علا [Planning and International Cooperation Authority. First National Voluntary Review on the Sustainable Development Goals. Syrian Arab Republic : Prime Minister's Office, 2020; 85]. URL: file:///D:/PHD/عجارم/_2020_Syria_Report_Arabic.pdf

7. Li G., Xuan Q., Akram M.W., Akhlaghi Y.G., Liu H., Shittu S. Building integrated solar concentrating systems : a review. *Applied Energy*. 2020; 260:114288. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114288

8. Good C., Chen J., Dai Y., Hestnes A.G. Hybrid photovoltaic-thermal systems in buildings : a review. *Energy Procedia*. 2015; 70:683-690. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.176

9. Nikolaeva I.O. Features of the integration of photovoltaic systems into the architecture of buildings (on the example of research, development, and production facilities). *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023; 2(63):115-129. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-115-129. EDN VZDYPK. (rus.).

10. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rumyantsev V.D. *Photoelectric conversion of concentrated solar radiation*. Leningrad, Nauka, Leningrad Department, 1989; 308. (rus.).

11. Cappelletti A., Nelli L.C., Reatti A. Integration and architectural issues of a photovoltaic/thermal linear solar concentrator. *Solar Energy*. 2018; 169:362-373. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.013

12. Cappelletti A., Catelani M., Ciani L., Kazimierzczuk M.K., Reatti A. Practical issues and characterization of a photovoltaic/thermal linear focus 20X solar concentrator. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016; 2464-2475. DOI: 10.1109/TIM.2016.2588638

13. Podkovalnikov S.V., Polomoshina M.A. Integration of renewable energy sources into the industrial enterprise electric power supply system. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(11):(142): 182-198. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-182-198. EDN YPWUJF. (rus.).

14. Polyakov I., Ilvitskaya S. The artistic image of architecture using alternative energy devices. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017; 1(38):160-173. EDN YGIKZV. (rus.).

15. Semikin P.P. *Principles of formation of architecture of high-rise buildings with renewable energy sources : diss. ... cand. arch.* Moscow, 2014; 40-41. EDN FPOSSO. (rus.).

16. Chesnokov S.A., Chesnokov A.G., Prilipko S.G. Use of thin-film solar modules in architecture. *JSC "GIS"*. 2014. (rus.).

17. Buzalo N.A., Ponomarev R.R. Standard solutions for industrial buildings with a metal frame built in the Soviet period. *Information technologies in the survey of operating buildings and structures : materials of the 18th International scientific and practical conference*. 2019; 9-14. EDN TOUCPZ. (rus.).

18. Finogenov A.I. Integrated types of industrial buildings using wind power plants. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 2:36-42. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.02.36-42. EDN CSLLNW. (rus.).

19. Androutsopoulos A., Drosou V., Christodoulaki R., Rovira A.J., Enríquez J., Abbas R. et al. Energy saving in industrial buildings using advanced concentrated solar thermal systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023; 1196(1):012024. DOI: 10.1088/1755-1315/1196/1/012024

20. Parthiv K., Turchi C. *Initial Investigation into the Potential of CSP Industrial Process Heat for the Southwest United States*. National Renewable Energy Laboratory, 2015.

21. Dyatkov S.V., Mikheev A.P. *Architecture of industrial buildings*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 550. (rus.).

Received June 4, 2024.

Adopted in revised form on October 20, 2024.

Approved for publication on October 20, 2024.

BIONOTES: Ahmad Maya — postgraduate student; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; maya.ahmad8877@gmail.com;

Alexsander I. Finogenov — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Urban Planning, Senior Researcher; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5969-0492, Scopus: 57200279286, ORCID: 0000-0003-2835-599X; finogenov45@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Применение кластерного анализа для определения характера использования участка улицы

Лариса Александровна Банникова, Виола Анатольевна Ларионова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Организация комфортной среды в российских городах ставит задачу реконструкции улично-дорожной сети и трансформации уличного пространства из зоны транзитного движения в общественное пространство. Подобный переход невозможен без учета потребностей всех пользователей уличного пространства и создания для них соответствующей инфраструктуры. Современная нормативная база не учитывает неоднородность характера использования улиц одной градостроительной категории, что влечет за собой отсутствие объективных параметров для создания этой инфраструктуры на разных участках улицы.

Материалы и методы. Использовались данные из открытых источников, статистические и графические сведения муниципальных учреждений, натурных обследований. С целью установления значений параметров, определяющих характер использования участка улиц, применен кластерный анализ отдельно по каждому пользователю: пешеходы, средства индивидуальной мобильности и общественный транспорт.

Результаты. Кластерный анализ позволил выявить совокупность факторов, определяющих характер использования участка улицы пешеходами, средствами индивидуальной мобильности и общественным транспортом. Учет характера дает возможность установить объем мероприятий по созданию инфраструктуры на каждом конкретном участке улицы.

Выводы. Предложенная методика установления важности пользователя на участке улицы позволяет объективно оценить необходимость размещения тех или иных элементов в поперечном профиле улиц при реконструкции. Анализ градостроительных условий, в которых располагаются участки улиц, такие как положение в плане города, наличие и характеристики прилегающей застройки, которая формирует поток транспорта, пешеходов и средств индивидуальной мобильности и определяет наличие центров тяготения или исключительно транзитной функции участка, позволит сформулировать набор рекомендаций по проектированию в условиях нового строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: классификация городских улиц, проектирование уличного пространства, пользователи уличного пространства, комфортная городская среда, кластерный анализ

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Банникова Л.А., Ларионова В.А. Применение кластерного анализа для определения характера использования участка улицы // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 20–36. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.20-36

Автор, ответственный за переписку: Лариса Александровна Банникова, l.a.bannikova@urfu.ru.

Application of cluster analysis to determine the pattern of use of a street section

Larisa A. Bannikova, Viola A. Larionova

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

ABSTRACT

Introduction. Creation of a comfortable environment in Russian cities sets a task to reconstruct the street and road network and transform the street space from a transit zone into a public space. Such transition is impossible without taking into account the needs of all street space users and creating the appropriate infrastructure for them. The current regulatory framework does not take into account the heterogeneous nature of street use within one urban development category, which leads to absence of objective parameters for creation of such infrastructure on different sections of the street.

Materials and methods. The authors used data from open sources, statistical and graphic data from municipal institutions, and data from field surveys. In order to determine the values of the parameters that determine the pattern of use of a street section, cluster analysis was applied separately for each user: pedestrians, individual mobility vehicles, and public transport.

Results. Cluster analysis allowed to determine the set of factors that determine the pattern of use of a street section by pedestrians, individual mobility vehicles and public transport. Considering the pattern of use allowed to identify the scope of measures required for creation of infrastructure on each specific street section.

Conclusions. The proposed methodology for determining the importance of a user on a street section allows to objectively assess the need to place certain elements in the cross-section of streets during reconstruction. The analysis of the urban

planning conditions in which street sections are located, such as the position in the city plan, the presence and characteristics of the adjacent development, which forms the flow of traffic, pedestrians and means of individual mobility and determines the presence of centres of gravity or exclusively transit function of the section, will allow to formulate a set of design recommendations in the conditions of new construction.

KEYWORDS: classification of city streets, street space design, street space users, comfortable urban environment, cluster analysis

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the editors and reviewers.

FOR CITATION: Bannikova L.A., Larionova V.A. Application of cluster analysis to determine the pattern of use of a street section. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):20-36. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.20-36 (rus.).

Corresponding author: Larisa A. Bannikova, l.a.bannikova@urfu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Задача преобразования улично-дорожной сети (УДС) с целью создания комфортной городской среды стоит перед городами России и мира. В условиях растущего уровня автомобилизации увеличиваются транспортные заторы, а также социальные и экологические проблемы пользования автомобилем, усиливается интерес к общественному транспорту и безмоторным видам транспорта. Уличное пространство рассматривается не только как коридор для перемещения всех групп пользователей, но и как общественное место [1, 2].

На рубеже XX в. в иностранной литературе появился термин «полноценные» улицы (complete streets) [3, 4], который в дальнейшем трансформировался в «жизнеспособные», «живые» улицы (vital streets) [5]. Основным принципом проектирования УДС сейчас является ориентация на человека, в частности, создание эффективной, безопасной, поддерживающей здоровье и экологически чистой зеленой транспортной системы, среды для медленных приятных путешествий. Исследователи изучают влияние городского дизайна, в том числе дизайна улиц, на благополучие населения и качество жизни [6], транспортное поведение населения [4, 7], процесс изоляции индивидуума от социума [8].

В настоящее время в мире существует большое количество руководств, гайдов и методических материалов по проектированию улиц с учетом их общественной функции и интересов всех пользователей пространства [9]. Основой подхода к проектированию служит четкая иерархия УДС, базирующаяся на предоставлении приоритета тому или иному пользователю в соответствии с политикой, сформулированной на уровне муниципалитета, что требует расширения существующей классификации улиц и дорог [10–12]. Отдельные исследования посвящены созданию условий для пешеходов [13, 14], велосипедистов и средств индивидуальной мобильности [15, 16], движению общественного транспорта [17–19], озеленению улиц и организации поверхностного водоотвода [20–22], объектному наполнению и рекомендациям по организации пространства улицы, незанятого зоной транзитного движения транспорта [23]. Объединение всех этих элементов в поперечный профиль, ограниченный

имеющейся застройкой или требованиями эффективного использования городского пространства, представляет сложную многоаспектную задачу.

В 2022 г. было опубликовано исследование на тему перераспределения пространства улиц между пользователями с целью осуществления перехода от политики, ориентированной на личный автомобиль, к модели устойчивого развития [24]. В работе рассмотрена матрица из 26 сценариев использования пространства улицы, основанных на потребностях пользователей и их видах активности, и 28 целей, связанных с экономическими, социальными эффектами и воздействием на окружающую среду. 26 сценариев оценивались по «важности» в пределах участка улиц по следующим значениям: 0 — условия для пользователя могут быть ухудшены или инфраструктура может быть убрана при необходимости; 1 — условия не должны быть хуже существующих и 2 — условия должны быть лучше, чем существующие. Описание предполагаемого эффекта от реализации мероприятий по перераспределению пространства улицы при этом носит ценностный характер и содержит качественные оценки: «скорее негативно», «нейтрально или неопределенно», «скорее позитивно». Необходимость создания системы объективной оценки характера использования участка улиц различными пользователями и определения объема мероприятий по созданию для них инфраструктуры остается актуальной задачей.

Основные пользователи улиц — пешеходы, велосипедисты и средства индивидуальной мобильности, общественный транспорт и индивидуальный транспорт. Современная нормативная база содержит требования по размещению и методике расчета ширины проезжей части. Принятие решения о необходимости и объеме мероприятий по созданию инфраструктуры для других пользователей на конкретном участке улицы должно основываться на анализе характера использования участка с учетом индекса важности пользователя [25]. Индекс важности в общем виде представляет собой интегральную характеристику использования участка улицы конкретным пользователем, а именно:

0 — пользователь отсутствует или представлен в небольшом объеме;

Табл. 1. Объем мероприятий с учетом присвоенного индекса важности для каждого пользователя
Table 1. Volume of activities taking into account the assigned Index of Importance for each user

Пользователь/значение параметров User/parameter value	Индекс важности для Index of Importance for		
	0	0,5	1
Пешеходы Pedestrians	Тротуар минимальной ширины*; организация мест отдыха Sidewalk of minimum width*; organization of rest areas	Тротуар рекомендуемой ширины с учетом интенсивности движения пешеходов; создание полосы озеленения вдоль тротуара; организация мест отдыха Sidewalk of recommended width taking into account the intensity of pedestrian traffic; creation of a green strip along the sidewalk; organization of rest areas	Тротуар рекомендуемой ширины с учетом интенсивности движения пешеходов; создание полосы озеленения вдоль тротуара; создание рекреационных островков и зон отдыха Sidewalk of recommended width taking into account the intensity of pedestrian traffic; creation of a green strip along the sidewalk; creation of recreational islands and rest areas
Средства индивидуальной мобильности Individual mobility vehicles	Организация движения средств индивидуальной мобильности по проезжей части или тротуару без организации велополосы или велодорожки Organization of movement of individual mobility vehicles on the roadway or sidewalk without organizing a bicycle lane or bicycle path	Организация велополосы на тротуаре или на проезжей части, или велодорожки нормативной ширины, обособленной от других пользователей полосой озеленения Organization of a bicycle lane on the sidewalk or on the roadway or on the roadway or a bicycle path of standard width, separated from other users by a strip of greenery	Организация велодорожки рекомендуемой ширины, обособленной от других пользователей полосой озеленения Organization of a bicycle path of the recommended width, separated from other users by a strip of greenery
Общественный транспорт Public transport	Организация движения общественного транспорта в общем потоке Organization of public transport movement in general flow	Организация движения общественного транспорта на выделенной полосе Organization of public transport movement on a dedicated lane	Организация движения общественного транспорта на выделенной или обособленной полосе; организация интеллектуальной системы управления дорожным движением с учетом предоставления приоритета общественному транспорту Organization of public transport traffic on a dedicated or separate lane; organization of an intelligent traffic management system considering priority to public transport

Примечание: * — минимальное значение ширины элемента принимается в соответствии с СП 42.13330.2016 с учетом градостроительной категории.
Note: * — minimum value of the element width is taken in accordance with CP 42.13330.2016, taking into account the urban planning category.

0,5 — использование пространства улицы пользователем не ярко выражено;
1 — присутствие пользователя ярко выражено.
Объем мероприятий с учетом присвоенного индекса важности для каждого пользователя приведен в табл. 1.
Для определения значений параметров, влияющих на присвоение индекса важности пользователей, были проанализированы участки улиц крупнейшего города на примере Екатеринбурга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ
Для определения значений параметров, влияющих на присвоение индекса важности пользователей, рассмотрены участки улиц общегородского значения 2-го и 3-го класса, магистральные улицы районного значения и улицы местного значения в Екатеринбурге. Для анализа участков улиц выбраны планировочные районы существующей застройки (рис. 1).
Всего в границах обследуемой территории располагается 1426 участков улиц выбранных категорий.

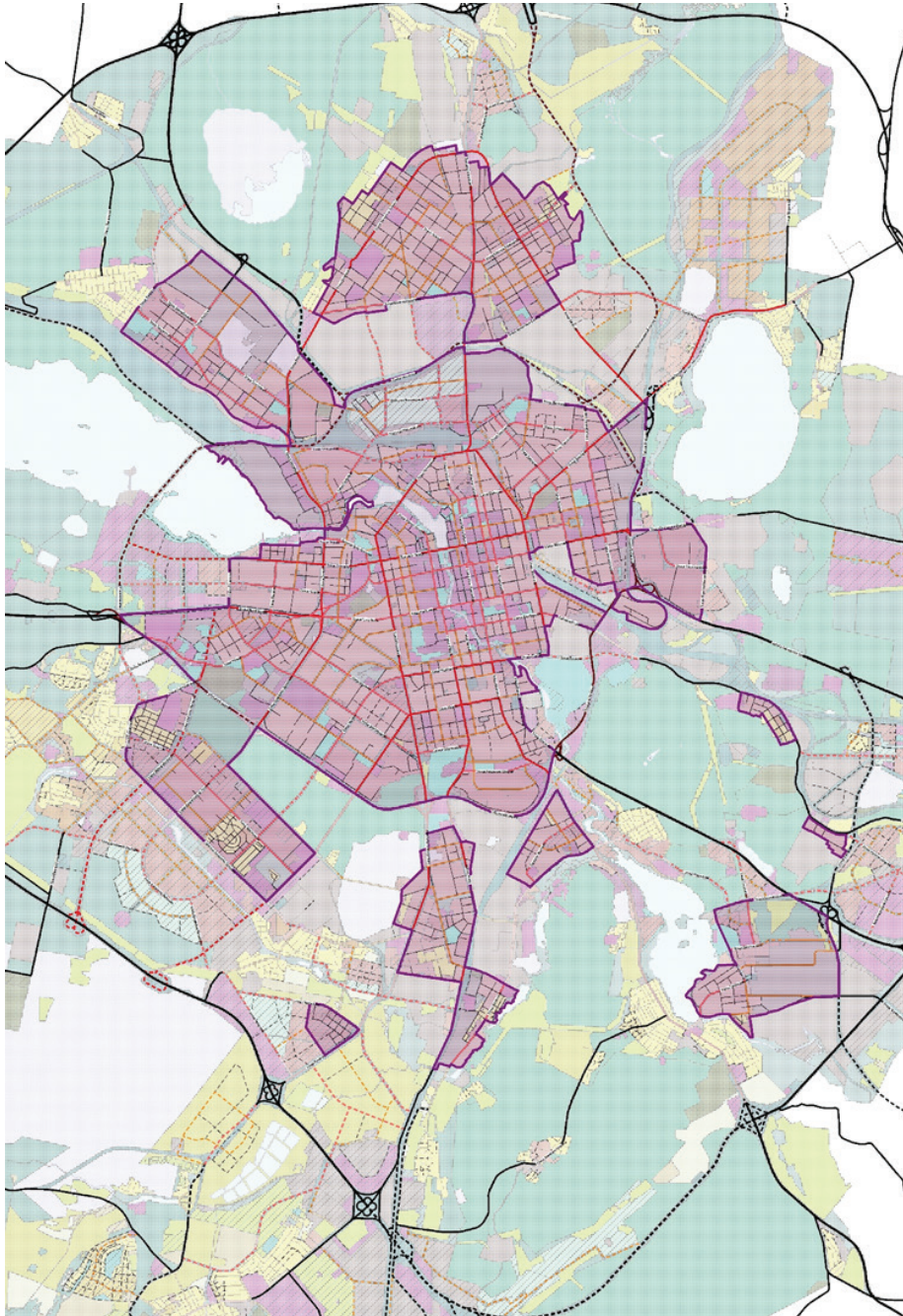


Рис. 1. Территория города, выбранная для проведения обследования и классификация улично-дорожной сети

Fig. 1. The city territory selected for the survey and the classification of the street and road network

Для определения величины необходимого объема репрезентативной выборки исследуемых участков улиц каждой градостроительной категории было принято: метод выборки — бесповторный, вид выборки — простая случайная, по степени охвата — большая выборка. Расчет общего количества участков улиц каждой категории в пределах территории, выбранной для анализа, производился по материалам, предоставленным МБУ «Мастерская генерального плана» Екатеринбурга с помощью инструментальной геоинформационной системы «ИнГео». Минимально необходимый объем выборки исследуемых участков улиц

по каждой градостроительной категории в пределах территории, выбранной для анализа, вычислялся по формуле:

$$n = \frac{N \cdot t^2 \cdot \delta^2}{N \cdot \Delta_x^2 + t^2 \cdot \delta^2},$$

где N — объем генеральной совокупности; t — коэффициент доверия, $t = 1,96$ для доверительной вероятности, равной 0,95; δ^2 — дисперсия доли единиц, обладающих каким-либо значением признака, принятая равной 0,25; Δ_x — предельная ошибка репрезентативной выборки, принята равной 5 %.

Табл. 2. Значения параметров, используемых в качестве входных параметров для кластеризации участков улиц
Table 2. Values of parameters used as input parameters for street segment clustering

Диапазон значений параметра, единицы измерения Parameter value range, units of measurement	Категория участка улицы Street section category			
	Магистральная улица общегородского значения 2-го класса Main street of citywide importance, 2nd class	Магистральная улица общегородского значения 3-го класса Main street of citywide importance, 3rd class	Магистральная улица районного значения Main street of regional significance	Улица местного значения Local street
Ширина в красных линиях, м Width in red lines, m	34,0–140,0	23,0–90,0	15,0–155,0	11,4–60,0
Ширина тротуара, м Sidewalk width, m	1,6–13,5	1,3–12,3	1,0–8,0	0,4–9,8
Плотность объектов торговли и услуг, ед./100 м Density of retail and service facilities, units per 100 m	0–9,68	0–10,33	0–5,88	0–5,92
Интенсивность движения пешеходов, пеш./ч Pedestrian traffic intensity, persons per hour	2–1809	101–1694	110–1285	11–1159
Интенсивность движения средств индивидуальной мобильности, ед./ч Intensity of individual mobility vehicles, units per hour	39–250	50–241	44–234	13–166
Частота движения общественного транспорта, ед./ч Public transport frequency, units per hour	6–165	1–163	1–81	4–61
Количество видов общественного транспорта Number of public transport types	1–4	1–4	1–3	1–3

Минимально необходимый объем выборки исследуемых участков улиц по всем категориям составил 671 участок.

Для анализа выбраны все участки улиц в центральном планировочном районе. По остальным районам участки для исследования распределялись равномерно.

С целью разделения участков улиц на кластеры использовался метод кластеризации k -средних (k -means) с применением программного комплекса Loginom¹. Количество кластеров в приведенном исследовании было задано изначально и равнялось трем исходя из ранее принятой градации значений индекса важности пользователей для участков улиц, что и определило выбор метода кластеризации наряду с простотой и высокой скоростью расчетов. Алгоритм кластеризации позволяет выделить группы (кластеры) объектов со схожими характеристиками на основе минимизации суммарного квадратичного отклонения их от центров кластеров. Процесс разбиения на кластеры начинается со случайного отне-

сения объекта к одному из кластеров и вычисления координат его центра. Далее каждое следующее наблюдение определяется в ближайший кластер исходя из условия, что евклидово расстояние до центра данного кластера меньше, чем до центров других кластеров. При этом пересчитывается положение центра кластера с учетом присоединенного объекта. Алгоритм продолжается до тех пор, пока все точки не отнесены к определенному кластеру и не выполнено условие минимальной внутрикластерной дисперсии.

В качестве входных параметров для кластеризации участков улицы с целью определения индекса важности пешеходов использовались такие переменные, как ширина участка улицы в красных линиях, плотность объектов торговли и услуг² и интенсивность пешеходного движения в час пик.

Для установления индекса важности для средств индивидуальной мобильности использовались такие входные параметры кластеризации, как ширина

¹ Loginom — аналитическая low-code платформа для анализа данных. URL: <https://loginom.ru/platform>

² Методика формирования индекса качества городской среды : утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 23.03.2019 № 510-р.

участка улицы в красных линиях, ширина тротуара и интенсивность пешеходного движения в час пик. В связи с неоднородностью прилегающей застройки данные по интенсивности движения пешеходов и средств индивидуальной мобильности, а также по ширине тротуара были заданы отдельно по четной и нечетной стороне улицы.

С целью кластеризации участков улицы для определения индекса важности общественного транспорта применялись такие входные параметры, как ширина участка улицы в красных линиях, частота движения общественного транспорта и количество видов общественного транспорта, включая внеуличный. В исследовании рассмотрены все улицы Екатеринбурга, по которым ходит общественный транспорт, при этом частота движения общественного транспорта была принята в одном направлении в связи с тем, что не на всех участках движение осуществляется в двух направлениях.

Сеть велодорожек и велополос в Екатеринбурге фрагментарна и представлена всего несколькими участками. В ходе проведения обследований выявлено, что наличие велодорожки на участке не оказывает влияния на интенсивность движения средств индивидуальной мобильности.

Диапазоны значений входных параметров для участков улиц разных категорий представлены

в табл. 2. Протяженность участков не является определяющим показателем в данной работе, поэтому в таблице не отражена.

Диапазоны значений параметров, полученных по результатам обследований и положенных в основу разделения участков на кластеры, еще раз подчеркивают неоднородность характера использования улиц одной категории и необходимость учета этой неравномерности при проектировании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты кластерного анализа для пешеходов

В результате кластеризации 36 % участков улиц с учетом их четной и нечетной сторон были отнесены к нулевому кластеру, 18 % — ко второму и 46 % — к третьему кластеру. Распределение участков улиц по индексу важности для пешеходов представлено в табл. 3.

По параметру «Ширина улицы в красных линиях» выделены три кластера с центрами на значениях 59, 41 и 28,7 м соответственно. Кластеры хорошо различимы.

По параметру «Интенсивность движения пешеходов» хорошо различимы три кластера с центрами на значениях 919, 640 и 401 пеш./ч соответственно.

По параметру «Плотность объектов торговли и услуг» различия между нулевым и вторым кла-

Табл. 3. Распределение участков улиц по индексу важности для пешеходов

Table 3. Distribution of street sections by Index of Importance for pedestrians

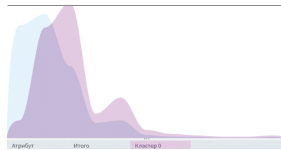
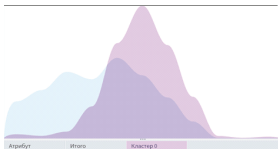
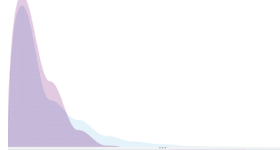
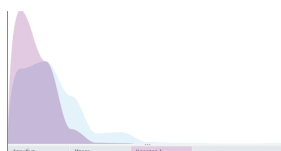
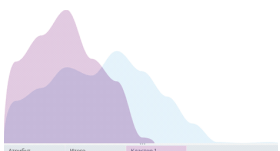
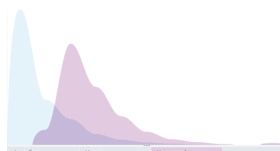
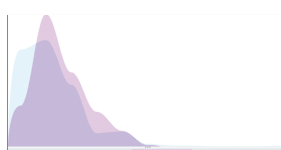
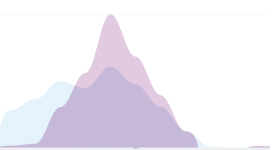
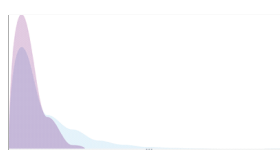
Номер кластера Cluster number	Доля участков улиц, отнесенных к кластеру, % Percentage of street sections assigned to a cluster, %	Ширина в красных линиях, м Width in red lines, m	Интенсивность движения пешеходов, пеш./ч Pedestrian traffic intensity, persons per hour	Плотность объектов торговли и услуг, ед./100 м Density of retail and service facilities, units per 100 m
0	36			
1	18			
2	46			

Табл. 4. Профили кластеров для пешеходов
Table 4. Profiles of clusters for pedestrians

Атрибут Attribute	Ширина в красных линиях, м Width in red lines, m				Интенсивность движения пешеходов, пеш./ч Pedestrian traffic intensity, persons per hour				Плотность объектов торговли и услуг, ед./100 м Density of retail and service facilities, units per 100 m			
	0	1	2	Итого Total	0	1	2	Итого Total	0	1	2	Итого Total
Значимость Significance	41	36	34	36	48	40	39	42	27	77	27	39
Минимум Minimum	15	22	11,4	11	0	0	0	0	0	1,6	0	0
Максимум Maximum	200	140	95	200	1809	1694	924	1809	3,66	10,3	2,25	10,3
Среднее Mean	59	41	28,7	41	919	640	401	628	0,73	3,2	0,43	1
Стандартное отклонение Standard deviation	26	14	10	23	221	244	240	330	0,72	1,3	0,58	1,3
Размах Range	185	118	83,6	189	1809	1694	924	1809	3,66	8,8	2,25	10,3
Значения Values	481	240	629	1350	481	240	629	1350	481	240	629	1350
Центр кластера Cluster centre	59	41	28,7	–	919	640	401	–	0,73	3,2	0,43	–

стером не ярко выражены, центры кластеров располагаются на значениях 0,73 и 0,43 единицы соответственно. Хорошо различим кластер 1 с центром на значении 3,2 м и значимость параметра 77, т.е. активность уличного фронта является важным параметром при распределении участков улиц по важности

для пешеходов. Профили кластеров для пешеходов приведены в табл. 4.
Разделение входных параметров на кластеры с учетом координат центров кластеров и стандартного отклонения представлено на рис. 2.
Значение нулевого кластера характеризуется интенсивностью движения пешеходов более 700 пеш./ч,

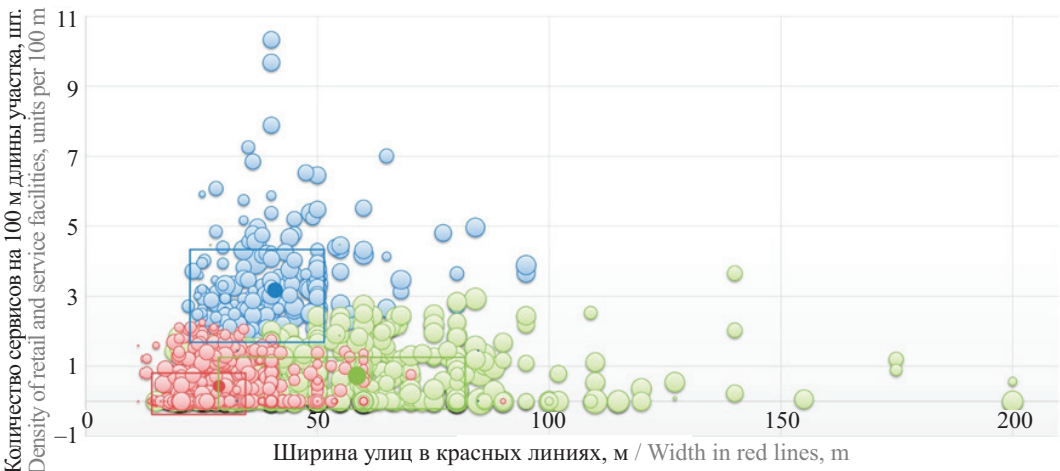


Рис. 2. Пузырьковая диаграмма распределения участков улиц на кластеры для пешеходов: нулевой кластер — зеленые точки; первый кластер — синие точки; второй кластер — красные точки. Площади точек пропорциональны интенсивности движения пешеходов, чел./ч. Центры кластеров и окрестности вокруг них размером, равным двум стандартным отклонениям, обозначены сплошным цветом соответствующего оттенка
Fig. 2. Bubble diagram of street section distribution into pedestrian clusters: 0 cluster — green dots; 1 cluster — blue dots; 2 cluster — red dots. The areas of the dots are proportional to the pedestrian traffic intensity, persons per hour. The cluster centres and their surroundings of size equal to two standard deviations are indicated by a solid colour of the corresponding shade

Табл. 5. Распределение участков улиц по индексу важности для средств индивидуальной мобильности
Table 5. Distribution of street sections by Index of Importance for individual mobility vehicles

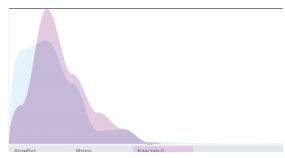
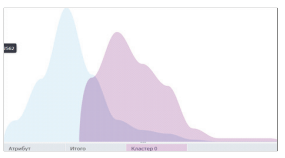
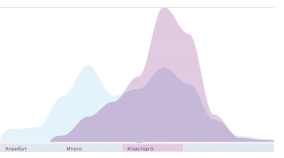
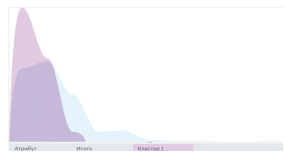
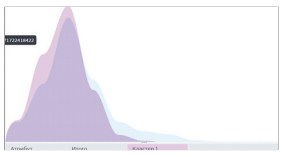
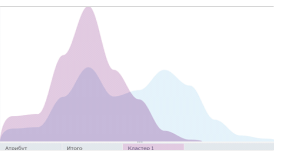
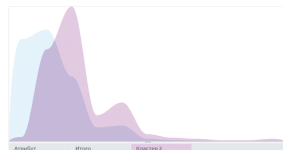
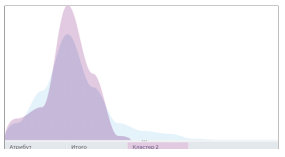
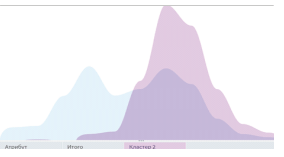
Номер кластера Cluster number	Доля участков улиц, отнесенных к кластеру, % Percentage of street sections assigned to a cluster, %	Ширина в красных линиях Width in red lines	Ширина тротуара, м Sidewalk width, m	Интенсивность движения средств индивидуальной мобильности, ед./ч Intensity of individual mobility vehicles, units per hour
0	14			
1	51			
2	35			

Табл. 6. Профили кластеров для средств индивидуальной мобильности
Table 6. Cluster profiles for individual mobility devices

Атрибут Attribute	Ширина в красных линиях, м Width in red lines, m				Ширина тротуара, м Sidewalk width, m				Интенсивность движения средств индивидуальной мобильности, ед./ч Intensity of individual mobility vehicles, units per hour			
	0	1	2	Итого Total	0	1	2	Итого Total	0	1	2	Итого Total
Значимость Significance	41	38	46	41	78	23	26	35	55	45	54	53
Минимум Minimum	18	11,4	20	11	4,2	0	0	0	54	0	39	0
Максимум Maximum	109	60	200	200	13,5	6,5	5,6	13,5	234	162	250	250
Среднее Mean	46	28,3	59	41	6,4	2,77	2,98	3,4	145	78	160	116
Стандартное отклонение Standard deviation	17	8,5	26	23	1,6	1,15	1,16	1,8	32	31	29	49
Размах Range	92	48,6	180	189	9,3	6,5	5,6	13,5	180	162	211	250
Значения Values	196	683	471	1350	196	683	471	1350	196	683	471	1350
Центр кластера Cluster centre	46	28,3	59	–	6,4	2,77	2,98	–	145	78	160	–

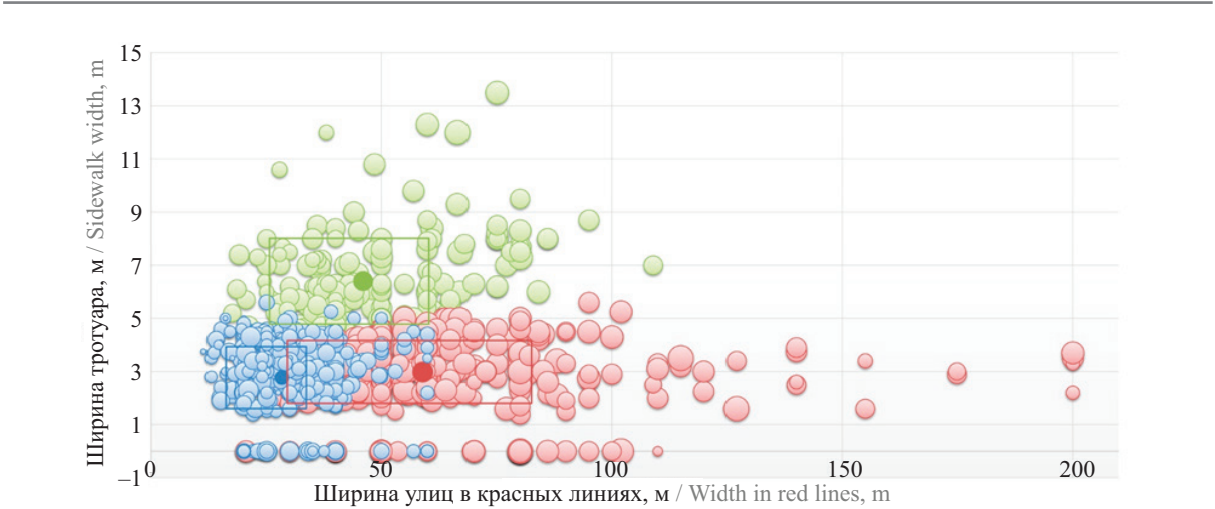


Рис. 3. Пузырьковая диаграмма распределения участков улиц на кластеры для средств индивидуальной мобильности: нулевой кластер — зеленые точки; первый кластер — синие точки; второй кластер — красные точки. Площади точек пропорциональны интенсивности движения средств индивидуальной мобильности, ед./ч. Центры кластеров и окрестности вокруг них размером, равным двум стандартным отклонениям, обозначены сплошным цветом соответствующего оттенка

Fig. 3. Bubble diagram of street section distribution into clusters for individual mobility vehicles: 0 cluster — green dots; 1 cluster — blue dots; 2 cluster — red dots. The areas of the dots are proportional to the intensity of individual mobility vehicles, units per hour. The cluster centres and their surroundings of size equal to two standard deviations are indicated in solid colour of the corresponding shade

средней шириной в красных линиях 59 м и средней плотностью сервисов на 100 м длины перегона, равной 0,73 ед.; первый кластер характеризуется интенсивностью движения пешеходов со средним значением 640 пеш./ч, шириной в красных линиях 41 м и активным уличным фронтом, равным 3,2 ед. на 100 м длины перегона; второй кластер выделяется невысокой интенсивностью движения пешеходов 400 пеш./ч,

Табл. 7. Распределение участков улиц по индексу важности для общественного транспорта

Номер кластера Cluster number	Доля участков улиц, отнесенных к кластеру, % Percentage of street sections assigned to a cluster, %	Ширина в красных линиях Width in red lines	Частота движения, ед./ч Public transport frequency, units per hour	Количество видов транспорта Number of public transport types
0	55			
1	34			
2	11			

Табл. 8. Профили кластеров для общественного транспорта
Table 8. Cluster profiles for public transport

Атрибут Attribute	Ширина в красных линиях, м Width in red lines, m				Частота движения, ед./ч Public transport frequency, units per hour				Количество видов транспорта Number of public transport types			
	0	1	2	Итого Total	0	1	2	Итого Total	0	1	2	Итого Total
Значимость Significance	26	31	84	36	37	59	41	51	52	73	85	91,5
Минимум Minimum	15	23	67	15	1	20	1	0	1	2	1	1
Максимум Maximum	70	95	155	155	68	165	75	165	3	4	3	4
Среднее Mean	42	51,5	94	51	22,3	82	28,6	43	1,58	2,99	1,98	2,11
Стандартное отклонение Standard deviation	12,4	14,3	26	22	14,4	33	16,9	36	0,52	0,27	0,66	857
Размах Range	55	72	88	140	68	145	74	165	3	2	2	0,8
Значения Values	223	140	44	407	223	140	44	407	223	140	44	407
Центр кластера Cluster centre	42	51,5	94	—	22,3	82	28,6	—	1,58	2,99	1,98	—

шириной улицы в красных линиях до 40 м и низкой активностью фронта со средним значением 0,43 ед. на 100 м длины перегона.

Результаты кластерного анализа для средств индивидуальной мобильности

В результате кластеризации 14 % участков улиц были отнесены к нулевому кластеру, 51 % — ко вто-

рому и 35 % — к третьему кластеру. Распределение участков улиц по индексу важности для средств индивидуальной мобильности приведено в табл. 5.

По параметру «Ширина улицы в красных линиях» выделены три кластера с центрами на значениях 46, 28 и 59 м соответственно. Кластеры достаточно хорошо различимы и схожи с получившимися при кластеризации по пешеходам.

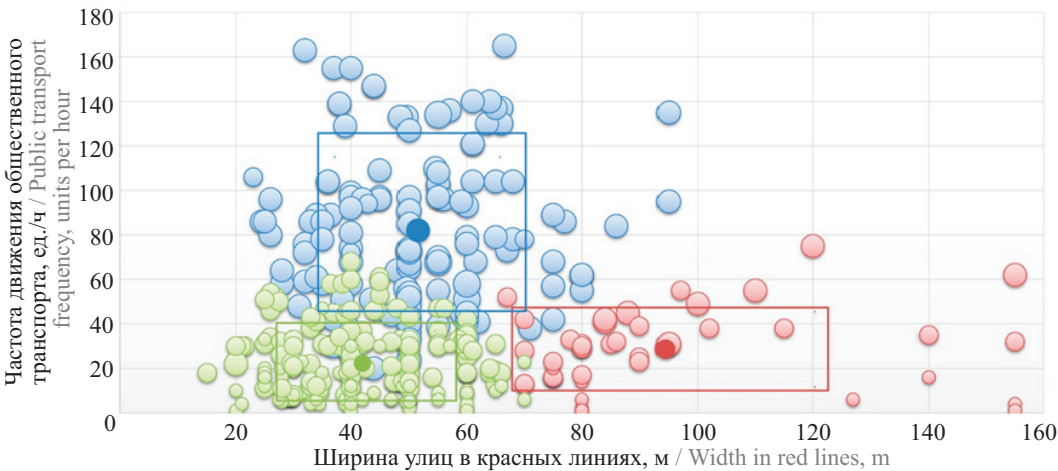


Рис. 4. Пузырьковая диаграмма распределения участков улиц на кластеры для общественного транспорта: нулевой кластер — зеленые точки; первый кластер — синие точки; второй кластер — красные точки. Площади точек пропорциональны количеству видов транспорта, ед. Центры кластеров и окрестности вокруг них размером, равным двум стандартным отклонениям, обозначены сплошным цветом соответствующего оттенка

Fig. 4. Bubble diagram of street section distribution into clusters for public transport: 0 cluster — green dots; 1 cluster — blue dots; 2 cluster — red dots. The areas of the dots are proportional to the number of public transport types, units. The cluster centres and their surroundings of size equal to two standard deviations are indicated by a solid colour of the corresponding shade

По параметру «Ширина тротуара» различия между первым и вторым кластером несут незначительный характер, центры кластеров располагаются на значениях 3,0 и 2,8 м соответственно. Хорошо различим кластер 0 с центром на значении 6,4 м и значимостью параметра, равной 78. Кластеры также схожи с получившимися при кластеризации по пешеходам.

По параметру «Интенсивность движения средств индивидуальной мобильности» хорошо различимы три кластера с центрами на значениях 145, 78 и 160 ед./ч соответственно.

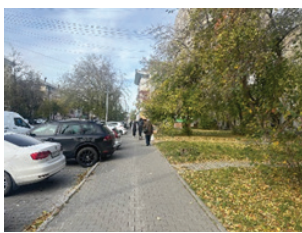
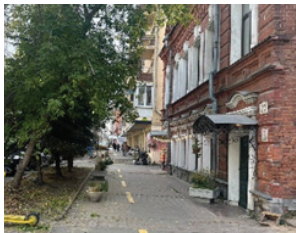
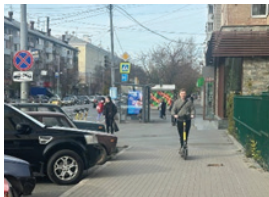
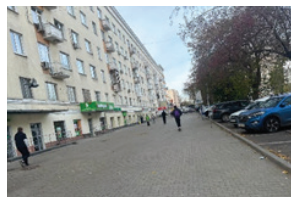
Профили кластеров для средств индивидуальной мобильности представлены в табл. 6.

Разделение входных параметров на кластеры с учетом координат центров кластеров и стандартного отклонения представлено на рис. 3.

Значение нулевого кластера характеризуется интенсивностью движения средств индивидуальной мобильности более 130 ед./ч, средней шириной в красных линиях, равной 46 м, и средним значением ширины тротуара 6,4 м; первый кластер характеризуется небольшой интенсивностью движения пешехо-

Табл. 9. Значения параметров для присвоения индекса важности пользователей

Table 9. Values of parameters for assigning the Index of Importance to users

Пользователь User	Индекс важности Index of Importance		
	0	0,5	1
Пешеходы Pedestrians	Интенсивность движения пешеходов до 600 пеш./ч при ширине в красных линиях до 30 м «активности» фронта до 1 двери на 100 м длины перегона Pedestrian traffic intensity up to 600 pedestrians per hour with a width in red lines up to 30 m, the front “activity” up to 1 door per 100 m of the street section length	Интенсивность движения пешеходов от 400 до 700 пеш./ч при ширине в красных линиях больше 30 м и «активности» фронта больше 2,5 дверей на 100 м длины перегона Pedestrian traffic intensity is more than 400 to 700 pedestrians per hour, the width in red lines is more than 30 m and the front “activity” is more than 2.5 doors per 100 m of the street section length	Интенсивность движения пешеходов более 700 пеш./ч при ширине в красных линиях больше 40 м и «активности» фронта до 2,5 дверей на 100 м длины перегона Pedestrian traffic intensity is more than 700 pedestrians per hour, the width in red lines is more than 40 m and the front “activity” is up to 2.5 doors per 100 m of the street section length
	Пример участка улицы по индексу важности для пешеходов An example of a street section according to the Index of Importance for Pedestrians		
			
Средства индивидуальной мобильности Individual mobility vehicles	Интенсивность движения средств индивидуальной мобильности менее 110 ед./ч при ширине в красных линиях до 40 м и ширине тротуара менее 3 м Traffic intensity of individual mobility vehicles is less than 110 units per hour with a width in red lines of up to 40 m and a sidewalk width less than 3 m	Интенсивность движения средств индивидуальной мобильности более 110 ед./ч при ширине в красных линиях от 40 до 60 м и средней ширине тротуара, равной 6 м Traffic intensity of individual mobility vehicles is more than 110 units per hour with a width in red lines from 40 to 60 m and an average sidewalk width 6 m	Интенсивность движения средств индивидуальной мобильности более 110 ед./ч при ширине в красных линиях больше 60 м Intensity of movement of individual mobility vehicles is more than 110 units per hour with a width in red lines more than 60 m
	Пример участка улицы по индексу важности для средств индивидуальной мобильности An example of a street section according to the Index of Importance for Individual mobility vehicles		
			

Окончание табл. 9 / End of the Table 9

Пользователь User	Индекс важности Index of Importance		
	0	0,5	1
Общественный транспорт Public transport	Частота движения общественного транспорта до 36 ед./ч при значении ширины улицы в красных линиях меньше 40 м Public transport frequency up to 36 units per hour with street width in red lines less than 40 m	Частота движения общественно-го транспорта от 12 до 36 ед./ч при значении ширины улицы в красных линиях больше 40 м и от 37 до 48 ед./ч при значении ширины улицы в красных линиях меньше 40 м Frequency of public transport from 12 to 36 units/hour with the street width in red lines more than 40 m and from 37 to 48 units per hour with the street width in red lines less than 40 m	Частота движения общественного транспорта более 49 ед./ч при любом значении ширины улицы в красных линиях и количестве видов транспорта Frequency of public transport higher than 49 units per hour at any value of the street width in red lines and the number of transport types
	Пример участка улицы по индексу важности для общественного транспорта An example of a street section according to the Index of Importance for public transport		
			

дов до 110 ед./ч, шириной в красных линиях до 40 м и средней шириной тротуара 2,77 м; второй кластер выделяется интенсивностью движения более 130 ед./ч, средней шириной тротуара 3 м и средним значением ширины в красных линиях 59 м.

Результаты кластерного анализа для общественного транспорта

В результате кластеризации 55 % участков улиц были отнесены к нулевому кластеру, 34 % — ко второму и 11 % — к третьему кластеру. Распределение участков улиц по индексу важности для общественного транспорта представлено в табл. 7.

По параметру «Ширина улицы в красных линиях» различия между первым и вторым кластером незначительны, центры кластеров располагаются на значениях 44 и 43 м соответственно. Хорошо различим нулевой кластер с центром на значении 63 м и значимостью параметра 84.

По параметру «Количество видов транспорта» различим нулевой кластер со значением 1–3 вида, среднее значение 1,58, первый кластер 2–4 вида со средним значением 2,99 и второй кластер 1–3 вида со средним значением 1,98.

По параметру «Частота движения» хорошо различимы три кластера с центрами на значениях 22, 82 и 29 ед./ч соответственно.

Профили кластеров для общественного транспорта приведены в табл. 8.

Разделение входных параметров на кластеры с учетом координат центров кластеров и стандартного отклонения представлено на рис. 4.

Таким образом, нулевой кластер характеризуется небольшой частотой движения, равной 22 ± 14 ед./ч,

нормативным значением ширины в красных линиях и 1–3 видами транспорта на участке; первый кластер характеризуется частотой движения 82 ± 33 ед./ч, нормативной шириной улицы в красных линиях и 2–4 видами транспорта на участке; второй кластер характеризуется частотой движения 29 ± 17 ед./ч, большой шириной улицы в красных линиях и наличием не более 3 видов транспорта.

Назначение индекса важности пользователей на основании проведенного кластерного анализа

Полученные в ходе кластерного анализа значения входных параметров позволили назначить значения для присвоения индекса важности пользователей (табл. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы оценить возможность применения предложенного подхода к реконструкции участков улиц Екатеринбурга, была рассмотрена магистральная улица общегородского значения Малышева. В пределах центрального планировочного района города она имеет одну градостроительную категорию, но разную ширину в красных линиях и разный характер использования, что отражено в табл. 10.

Для разработки поперечного профиля был выбран участок от ул. 8 Марта до ул. Добролюбова, так как это несимметричный поперечный профиль в соответствии с индексами важности пользователей, а также имеет ширину в красных линиях, которые совпадают с линией застройки, ширину 36 м, что меньше рекомендуемой для данной категории. В настоящее время в поперечном профиле улица представляет собой шестиполосную проезжую часть ненорматив-

Табл. 10. Характеристика улицы Малышева по характеру использования с применением индекса важности пользователей для разных сторон улиц

Table 10. Characteristics of Malysheva street by type of use using the Index of Importance for users for different sides of the street

Участок Street section		Ширина в красных линиях, м Width in red lines, m	Индекс важности Index of Importance					
от from	до to		Пешеходы Pedestrians		Средства индиви- дуальной мобиль- ности Individual mobility vehicles		Общественный транспорт Public transport	
			четная even	нечетная odd	четная even	нечетная odd	четная even	нечетная odd
Верх-Исетского бульвара Verkh-Isetsky Blvd	Московской Moscovskaya	40	0,5	0,5	1	0,5	1	1
Московской Moscovskaya	Сакко и Ванцетти Sacco and Vanzetti	28	0,5	0,5	0,5	0	1	1
Сакко и Ванцетти Sacco and Vanzetti	Хохрякова Khokhryakova	28	0,5	0,5	0,5	0	1	1
Хохрякова Khokhryakova	8 Марта 8 March	35	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1
8 Марта 8 of March	Добролюбова Dobrolyubova	36	0	1	0,5	1	1	1
Добролюбова Dobrolyubova	Гоголя Gogol	36	0,5	0,5	1	0,5	1	1
Гоголя Gogol	Карла Либкнехта Karl Liebknecht	65	0,5	0,5	1	0,5	1	1
Карла Либкнехта Karl Liebknecht	Мамина-Сибиряка Mamin-Sibiryak	65	0,5	0,5	1	1	1	1
Мамина-Сибиряка Mamin-Sibiryak	Луначарского Lunacharskogo	50	0,5	0,5	1	0,5	1	1
Луначарского Lunacharskogo	Бажова Bazhova	36,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1
Бажова Bazhova	Восточной Vostochnaya	34	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1

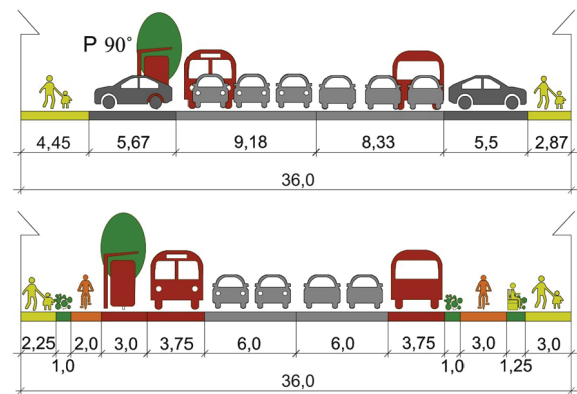


Рис. 5. Существующий и рекомендуемый поперечный профиль ул. Малышева на участке от 8 Марта до Добролюбова. Красные линии совпадают с линией застройки

Fig. 5. The existing and recommended cross-section of Malysheva Street in the section from 8 March to Dobrolyubov. The red lines coincide with the building line

ной ширины, парковочные карманы и пешеходный тротуар. По четной стороне улицы располагается остановка общественного транспорта.

В соответствии с назначенными индексами важности пользователей и рекомендациями, приведенными в табл. 1 настоящей статьи, по четной стороне требуется создание пешеходного тротуара нормативной ширины, организация велополосы на тротуаре или проезжей части, или велодорожки нормативной ширины, обособленной от других пользователей полосой озеленения, и организация движения общественного транспорта на выделенной или обособленной полосе; по нечетной стороне требуется тротуар рекомендуемой ширины с учетом интенсивности движения пешеходов, создание полосы озеленения вдоль тротуара, рекреационных островков и зон отдыха, организация велополосы на тротуаре или на проезжей части, или велодорожки рекомендуемой ширины, обособленной от других пользова-

телей полосой озеленения, и организация движения общественного транспорта на выделенной или обособленной полосе. Ширина полос проезжей части приведена в соответствие действующим нормативам и принята минимальной для данной категории. Существующий и рекомендуемый поперечный профиль ул. Малышева на участке от 8 Марта до Добролюбова представлен на рис. 5.

Применение кластерного анализа к характеристикам существующих участков УДС Екатеринбурга позволил назначить значения параметров для присво-

ения индекса важности пользователей уличного пространства, которые помогают объективно оценить характер использования участка улицы и определить необходимость и полноту мероприятий по созданию соответствующей инфраструктуры, особенно в стесненных условиях имеющейся городской застройки.

Полученные значения параметров для присвоения индекса важности пользователя позволяют проектировать несимметричный поперечный профиль при необходимости, производя оценку условий с каждой стороны от оси участка улицы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Anciaes P., Jones P.* Transport policy for liveability — Valuing the impacts on movement, place, and society // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 132. Pp. 157–173. DOI: 10.1016/j.tra.2019.11.009
2. Данилина Н.В., Теплова И.Д. «Устойчивая» улица — формирование общественных пространств на городских улицах // *Экология урбанизированных территорий*. 2018. № 4. С. 74–80. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-14074. EDN YYFSYP.
3. Преловская Е.С., Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Энгель Б. Транспортное планирование в российских городах: перспективы актуализации классификации и подхода к проектированию городских улиц // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2017. № 6 (58). С. 113–119. EDN YNHMYL
4. *Bas J., Al-Khasawneh M.B., Erdoğan S., Cirillo C.* How the design of Complete Streets affects mode choice: Understanding the behavioral responses to the level of traffic stress // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2023. Vol. 173. P. 103698. DOI: 10.1016/j.tra.2023.103698
5. *Wang F., Tan C., Li M., Gu D., Wang H.* Research on Traffic Design of Urban Vital Streets // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 11. P. 6468. DOI: 10.3390/su14116468
6. *Mouratidis K.* Urban planning and quality of life : a review of pathways linking the built environment to subjective well-being // *Cities*. 2021. Vol. 115. P. 103229. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103229
7. *Anciaes P., Jones P.* Transport policy for liveability — Valuing the impacts on movement, place, and society // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 132. Pp. 157–173. DOI: 10.1016/j.tra.2019.11.009
8. Ковалева Т.Н. Транспортные проблемы современного города в контексте модернизации городского пространства // *Гуманитарные и социальные науки*. 2013. № 4. С. 26–34. EDN RCLQJT.
9. *Wen L., Xiao L.* Redevelopment of Urban Public Space : a Review of Urban Street Design Manuals in the World // *Urban Transport of China*. 2014. Vol. 12. Pp. 10–17.
10. *Jones P., Marshall S., Boujenko N.* Creating more people-friendly urban streets through ‘link and place’ street planning and design // *IATSS Research*. 2008. Vol. 32. Issue 1. Pp. 14–25. DOI: 10.1016/s0386-1112(14)60196-5
11. Преловская Е.С. Мультифункциональное уличное пространство: формирование новых классов улиц на основе кластерного анализа // *Градостроительство и архитектура*. 2016. № 3 (24). С. 129–134. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.21. EDN WWOJCP.
12. Шубин Д.А., Скубрий Е.В. Приоритетные направления деятельности органов власти Москвы по проектированию и комплексному благоустройству улично-дорожной сети // *Вестник МГПИУ. Серия: Экономика*. 2022. № 2 (32). С. 16–23. DOI: 10.25688/2312-6647.2022.32.2.02. EDN LGDGKP.
13. *Labdaoui K., Mazouz S., Acidi A., Cools M., Moeinaddini M., Teller J.* Utilizing thermal comfort and walking facilities to propose a comfort walkability index (CWI) at the neighbourhood level // *Building and Environment*. 2021. Vol. 193. P. 107627. DOI: 10.1016/j.buil-denv.2021.107627
14. Галышев А.Б. Оценка качества условий движения пешеходов по тротуарам // *International Journal of Advanced Studies*. 2021. Т. 11. № 3. С. 83–88. DOI: 10.12731/2227-930X-2021-11-3-83-88. EDN CUMCGJ.
15. *Müggenburg H., Blitz A., Lanzendorf M.* What is a good design for a cycle street? — User perceptions of safety and attractiveness of different street layouts // *Case Studies on Transport Policy*. 2022. Vol. 10. Issue 2. Pp. 1375–1387. DOI: 10.1016/j.cstp.2022.04.021
16. Власов Д.Н., Петросян Ж.А. Методика определения ширины полосы движения для микромобильных видов транспорта // *Устойчивое развитие территорий : сб. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф.* 2022. С. 265–269. EDN ICWWDP.
17. Фомин Е.В., Зеер В.А., Арефьева Е.С., Голуб Н.В. Обеспечение приоритета городского пассажирского транспорта общего пользования на улично-дорожной сети города // *Вестник Сибирского госу-*

дарственного автомобильно-дорожного университета. 2020. Т. 17. № 3 (73). С. 390–399. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-3-390-399. EDN MSEZEF.

18. Булавина Л.В. Мухаметгалиева А.Р. Совершенствование автобусного сообщения в городе как средство решения транспортных проблем // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. № 2 (13). С. 73–85. EDN TBQJXE.

19. Лантева Е.А., Булавина Л.В. Совершенствование организации трамвайного движения на примере Екатеринбурга // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. № 4 (15). С. 94–105. EDN ZGDTGY.

20. Rodriguez-Valencia A., Ortiz-Ramirez H.A. Understanding Green Street Design: Evidence from Three Cases in the U. S. // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 4. P. 1916. DOI: 10.3390/su13041916

21. Банникова Л.А., Хриченков А.В., Бурцев А.Г., Тиганова И.А., Третьякова А.С., Груданов Н.Ю. и др. Принципы формирования подхода к благоустройству озелененных пространств Екатеринбурга // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26. № 6. С. 106–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-106-113. EDN DDUDYD.

22. Тиганова И.А., Банникова Л.А., Байборода О.Д. Рекомендации по благоустройству улиц г. Екатеринбурга с учетом характеристики ландшафта // Актуальные проблемы строительства, природообустройства, кадастра и землепользования : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 207–211. EDN WPULLE.

23. Теплова И.Д. Градостроительный подход к формированию общественных пространств городских улиц (опыт Берлина и Москвы) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2021. № 1 (33). С. 101–112. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-101-112. EDN KLTCS.

24. Anciaes P., Jones P. Pedestrian priority in street design — how can it improve sustainable mobility? // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 60. Pp. 220–227. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.12.029

25. Банникова Л.А. Пространственная организация участка улицы в зависимости от характера использования // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 5. С. 105–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-105-115. EDN FHFVGL.

Поступила в редакцию 9 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 7 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 10 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Лариса Александровна Банникова** — старший преподаватель кафедры городского строительства; **Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ)**; 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; l.a.bannikova@urfu.ru;

Виола Анатольевна Ларионова — кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора по проектам развития образования, заведующая кафедрой экономики и управления строительством и рынком недвижимости; **Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ)**; 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; v.a.larionova@urfu.ru.

Вклад авторов:

Банникова Л.А. — идея и концепция исследования, сбор и подготовка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций и таблиц, итоговые выводы.

Ларионова В.А. — развитие методологии, аналитика данных, визуализация результатов исследования, научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Anciaes P., Jones P. Transport policy for liveability — Valuing the impacts on movement, place, and society. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020; 132:157-173. DOI: 10.1016/j.tra.2019.11.009

2. Danilina N.V., Teplova I.D. “Sustainable” street — formation public spaces on city streets. *Ecology of Urban Areas*. 2018; 4:74-80. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-14074. EDN YYFSYP. (rus.).

3. Prelovskaya E.S., Levashev A.G., Michaylov A.U., Engel B. The sustainable transportation planning in russian cities: perspectives for street classification and urban street

design. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 6(58):113-119. EDN YNHMYL. (rus.).

4. Bas J., Al-Khasawneh M.B., Erdoğan S., Cirillo C. How the design of Complete Streets affects mode choice: Understanding the behavioral responses to the level of traffic stress. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2023; 173:103698. DOI: 10.1016/j.tra.2023.103698

5. Wang F., Tan C., Li M., Gu D., Wang H. Research on Traffic Design of Urban Vital Streets. *Sustainability*. 2022; 14(11):6468. DOI: 10.3390/su14116468

6. Mouratidis K. Urban planning and quality of life : a review of pathways linking the built environment to subjective well-being. *Cities*. 2021; 115:103229. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103229
7. Anciaes P., Jones P. Transport policy for liveability — Valuing the impacts on movement, place, and society. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020; 132:157-173. DOI: 10.1016/j.tra.2019.11.009
8. Kovaleva T.N. Transport problems of a modern city in the context of modernization of urban space. *The Humanities and Social Sciences*. 2013; 4:26-34. EDN RCLQJT. (rus.).
9. Wen L., Xiao L. Redevelopment of Urban Public Space: A Review of Urban Street Design Manuals in the World. *Urban Transport of China*. 2014; 12:10-17.
10. Jones P., Marshall S., Boujenko N. Creating more people-friendly urban streets through 'link and place' street planning and design. *IATSS Research*. 2008; 32(1):14-25. DOI: 10.1016/s0386-1112(14)60196-5
11. Prelovskaya E.S. Multifunctional street space: development street classification based on cluster analysis. *Urban Construction and Architecture*. 2016; 3(24):129-134. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.21. EDN WWOJCP. (rus.).
12. Shubin D.A., Skubriy E.V. Priority areas of activity of the authorities of Moscow for the design and integrated improvement of the road network. Bulletin of the Moscow city pedagogical University. *The series "Economics"*. 2022; 2(32):16-23. DOI: 10.25688/2312-6647.2022.32.2.02. EDN LGDGKP. (rus.).
13. Labdaoui K., Mazouz S., Acidi A., Cools M., Moeinaddini M., Teller J. Utilizing thermal comfort and walking facilities to propose a comfort walkability index (CWI) at the neighbourhood level. *Building and Environment*. 2021; 193:107627. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107627
14. Galyshev A.B. Assessment of the quality of pedestrian traffic conditions on sidewalks. *International Journal of Advanced Studies*. 2021; 11(3):83-88. DOI: 10.12731/2227-930X-2021-11-3-83-88. EDN CUMCGJ. (rus.).
15. Muggenburg H., Blitz A., Lanzendorf M. What is a good design for a cycle street? — User perceptions of safety and attractiveness of different street layouts. *Case Studies on Transport Policy*. 2022; 10(2):1375-1387. DOI: 10.1016/j.cstp.2022.04.021
16. Vlasov D.N., Petrosyan Zh.A. Methodology for determining the width of the traffic lane for micromobility modes of transport. *Sustainable development of territories : collection of reports of the IV International scientific and practical conference*. 2022; 265-269. EDN ICWWDP. (rus.).
17. Fomin E.V., Zeer V.A., Arefieva E.S., Golub N.V. Ensuring priority for public urban passenger transport on urban streets and road network. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(3):390-399. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-3-390-399. EDN MSEZEF. (rus.).
18. Bulavina L.V., Mukhaletgaliyeva A.R. Transit service in the city as a means of solving transport problems improving bus. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2020; 2(13):73-85. EDN TBQJXE. (rus.).
19. Lapteva E.A., Bulavina L.V. Improvement of tram service's organization in terms of Yekaterinburg. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2020; 4(15):94-105. EDN ZGDTGY. (rus.).
20. Rodriguez-Valencia A., Ortiz-Ramirez H.A. *Understanding Green Street Design: Evidence from Three Cases in the U.S. Sustainability*. 2021; 13(4):1916. DOI: 10.3390/su13041916
21. Bannikova L.A., Khrichenkov A.V., Burtsev A.G., Tiganova I.A., Tret'yakova A. S., Grudanov N.Yu. et al. Modern foundations for green areas formation in Ekaterinburg. *Forestry Bulletin*. 2022; 26(6):106-113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-106-113. EDN DDUDYD. (rus.).
22. Tiganova I.A., Bannikova L.A., Baiborodova O.D. Yekaterinburg street improvement guide based on landscape characteristics. *Actual problems of construction, environmental management, cadastre and land use : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference*. 2022; 207-211. EDN WPULLE. (rus.).
23. Teplova I.D. Urban planning approach to the formation public spaces of city streets (experience of berlin and Moscow). *Biospheric compatibility: human, region, technologies*. 2021; 1(33):101-112. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-101-112. EDN KLTCSC. (rus.).
24. Anciaes P., Jones P. Pedestrian priority in street design — how can it improve sustainable mobility? *Transportation Research Procedia*. 2022; 60:220-227. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.12.029
25. Bannikova L. Spatial organization of a street section depending on the nature of use. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2023; 5:105-115. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-105-115. EDN FHFVGL. (rus.).

Received August 9, 2024.

Adopted in revised form on October 7, 2024.

Approved for publication on October 10, 2024.

BIONOTES: Larisa A. Bannikova — senior lecturer of the Department of Urban Construction; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); 19 Mira st., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; l.a.bannikova@urfu.ru;

Viola A. Larionova — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Education Development Projects, Head of the Department of Economics and Management of Construction and the Real Estate Market; **Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; v.a.larionova@urfu.ru.

Contribution of the authors:

Larisa A. Bannikova — research idea, research concept, collection and preparation of material, writing of the original text, creation of illustrations and tables, final conclusions.

Viola A. Larionova — development of methodology, data analytics, visualization of research results, scientific editing.

The authors declare no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07:624.074

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.37-49

Экспериментальное и численное сравнение напряженно-деформированного состояния арки и комбинированной арочной конструкции

Вера Витальевна Долгушева, Александр Майорович Ибрагимов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Экспериментальные исследования натуральных строительных конструкций покрытий трудоемки, имеют высокую стоимость, не предполагают размещение в лабораториях из-за больших габаритов. В связи с этим часто испытания строительных конструкций проводятся на масштабных моделях. Работа комбинированных арочных систем малоизучена, расчетным моделям таких систем требуется экспериментальное подтверждение. Представленное экспериментальное исследование направлено на получение данных о действительной работе арки и комбинированной арочной конструкции с лучевыми затяжками для последующего сопоставления экспериментальных данных с расчетными моделями.

Материалы и методы. Экспериментальная модель разработана с использованием смешанного подобия в масштабе 1:10. Физико-механические характеристики материалов модели определены по стандартным методикам. Разработаны и описаны способ создания заданного преднапряжения в затяжках арки и методика ее испытания. Расчетные модели реализованы в программном конечно-элементном комплексе ЛИРА-САПР с учетом геометрически нелинейного характера работы конструкции, напряжения в сечениях установлены с помощью процессора «Конструктор сечений».

Результаты. По результатам экспериментальных исследований и численных расчетов получены напряжения и перемещения в сечениях арок. Показаны перемещения схемы, графики соответствия экспериментальных данных и результатов расчета. Проанализированы направления для улучшения экспериментальных моделей подобных комбинированных систем с затяжками.

Выводы. Арочная комбинированная система с лучевыми затяжками позволяет выровнять значения напряжений в поясе арки в сравнении с аркой без затяжек. Максимальные напряжения в сечениях арки и максимальные прогибы в середине пролета арки снижаются в 3 раза при устройстве затяжек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированные конструкции, стальная арка с лучевыми затяжками, преднапряжение, арочная экспериментальная модель, масштабный эксперимент, арочно-вантовая система, геометрическая нелинейность, ЛИРА-САПР, моделирование вант

Благодарности. Авторы выражают благодарность директору ИПГС, заведующему кафедрой МДК, доктору технических наук А.Р. Туснину; заведующему кафедрой ЖБК, доктору технических наук А.Г. Тамразяну; заместителю директора НИИ ЭМ О.А. Корневу; заведующему лабораторией испытаний строительных конструкций материалов и изделий В.А. Какуше; старшему преподавателю кафедры МДК Т.В. Долгушеву; преподавателю кафедры ЖБК М.В. Кудрявцеву за консультации и поддержку в подготовке экспериментального исследования; выпускнику кафедры сварки, диагностики и специальной робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана Е.А. Сутягину за помощь в изготовлении экспериментальной модели; сотрудникам лаборатории испытаний строительных конструкций инженерам М.В. Кудрявцеву, Х.Х. Абдул Ахада, М.З. Шарипову, Ф.М. Вардак, Ю.А. Жидкову, аспиранту кафедры МДК П.А. Спасскому за помощь в проведении экспериментального исследования; рецензентам за проявленное внимание к работе и ценные замечания. Экспериментальные исследования проведены в рамках гранта НИУ МГСУ для аспирантов на проведение физических экспериментов в 2023 г. при поддержке сотрудников лаборатории испытаний строительных конструкций материалов и изделий НИИ ЭМ в лаборатории каменных и железобетонных конструкций.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Долгушева В.В., Ибрагимов А.М. Экспериментальное и численное сравнение напряженно-деформированного состояния арки и комбинированной арочной конструкции // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 37–49. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.37-49

Автор, ответственный за переписку: Вера Витальевна Долгушева, DolgushevaVV@yandex.ru.

Experimental and numerical comparison of the stress-strain state of an arch and a combined arch structure

Vera V. Dolgusheva, Alexander M. Ibragimov

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

ABSTRACT

Introduction. Experimental research projects of full-scale building roof constructions are labour-intensive, high-cost, and do not require placement in laboratories due to their large size. In this regard, tests of building constructions are often carried out on scale models. The operation of combined arch systems is poorly studied; calculation models of such systems require experimental confirmation. The presented experimental research project is aimed at obtaining data on the actual operation of the arch and a combined arch structure with radial ties for subsequent comparison of experimental data with calculation models.

Materials and methods. The experimental model is developed using mixed similarity at a scale of 1:10. The physical and mechanical parameters of the model materials were determined using standard methods. A method for creating a given prestress in the arch ties and a method for testing it are developed and described. The calculation models are implemented in the LIRA-SAPR finite element software package, considering the geometrically nonlinear structure operation, the stresses in the arch sections are determined using the "Section Designer" processor.

Results. Based on the results of experimental studies and numerical calculations, stresses and displacements in arch sections were obtained. The movements of the circuit, graphs of correspondence between experimental data and calculation results are shown. Directions for improving experimental models of such combined systems with ties are analyzed.

Conclusions. An arch combined system with radial ties allows to equalize the stress values in the arch belt in comparison with an arch without ties. The maximum stresses in the arch sections and the maximum deflections in the middle of the arch span are reduced by 3 times when tightening is installed.

KEYWORDS: combined structures, steel arch with a tie, prestressing, arch experimental model, scale test, cable roof system supported by arches, geometrical nonlinearity, LIRA-SAPR, prestressing using temperature, cable stay modelling

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the director of the Institute of Industrial and Civil Construction, head of the Department of Metal and Wooden Structures (MWS), Doctor of Technical Sciences. A.R. Tusnin; Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures (RCS), Doctor of Technical Sciences A.G. Tamrazyan; Deputy Director of the Scientific Research Institute of Experimental Mechanics (SRI EM) O.A. Kornev; the head of the laboratory for testing building structures, materials and products, V.A. Kakusha; senior teacher of the MWS department T.V. Dolgushev; teacher of the RCS department, M.V. Kudryavtsev for consultations and support in the preparation of the experimental study; graduate of the Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics at Moscow State Technical University. N.E. Bauman E.A. Sutyagin for assistance in making the experimental model; employees of the laboratory for testing building structures, engineers M.V. Kudryavtsev, H.H. Abdul Ahad, M.Z. Sharipov, F.M. Vardak, Y.A. Zhidkov, postgraduate student of the MWS department P.A. Spassky for assistance in conducting the experimental research; reviewers for their attention to the work and valuable comments. Experimental studies were carried out within the framework of a grant from the National Research University MGSU for graduate students to conduct physical experiments in 2023 with the support of employees of the laboratory for testing building structures of materials and products of the SRI EM in the laboratory of Stone and Reinforced Concrete Structures.

FOR CITATION: Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Experimental and numerical comparison of the stress-strain state of an arch and a combined arch structure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):37-49. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.37-49 (rus.).

Corresponding author: Vera V. Dolgusheva, DolgushevaVV@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Область применения арочных систем имеет широкий диапазон: в составе несущих конструкций арки часто используют в протяженных зданиях, таких как спортивные комплексы (катки, баскетбольные залы, конькобежные центры и др.), крытые рынки, галереи или холлы торговых центров, складские помещения, ангары, промышленные здания. Наибольшее распространение арочные комбинированные системы получили при строительстве мостов [1–7].

В статьях [8, 9] приведены основные виды арочно-вантовых систем и примеры их применения в качестве покрытий общественных зданий, указаны преимущества комбинированных систем в сравнении с простыми арками и ключевые проблемы, которые

возникают при их проектировании. В числе преимуществ отмечается, что комбинированные конструкции обладают высокой несущей способностью при относительно небольшом весе [8, 10, 11]. Среди проблем, связанных с их проектированием, выделена малоизученность различных арочно-вантовых систем из-за недостаточности или отсутствия детальных теоретических и экспериментальных исследований.

В 2021 г. был выпущен СП 494.1325800¹, в котором есть раздел, посвященный проектированию комбинированных систем, в том числе арочных. В разделе представлены варианты арочных комбинированных

¹ СП 494.1325800.2020. Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила проектирования. 2021. 77 с.

систем, даны некоторые рекомендации по их конструированию, но не приведены методики подбора натяжения в затяжках для достижения рационального по металлоемкости конструктивного решения. Среди основных арочно-вантовых комбинированных систем наиболее рациональными с точки зрения металлоемкости являются арки с центрально сосредоточенными (радиальными) затяжками с соотношением стрелы подъема к пролету $f:L = 1:3$ и арки с лучевыми затяжками с соотношением $f:L = 1:4$ [12]. В публикации [13] показаны результаты исследования работы арки с лучевыми затяжками с соотношением $f:L = 1:4$. Рациональное по металлоемкости решение арки с лучевыми затяжками пролетом 30 м достигается при выполнении следующих условий: восемь панелей и затяжек, пояс арки из квадратной трубы, определенное распределение преднапряжения в затяжках.

Экспериментальные исследования натуральных строительных конструкций покрытий трудоемки, имеют высокую стоимость, не предполагают размещение в лабораториях из-за больших габаритов, однако такие испытания хорошо согласуются с численными расчетами [14, 15]. Поэтому часто испытания строительных конструкций покрытий проводятся на масштабных моделях [16–25].

Цель настоящего экспериментального исследования — сравнение работы арки без затяжек с арочной комбинированной системой с лучевыми затяж-

ками и сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов. При выполнении экспериментального и численного исследования решены следующие задачи: определены физико-механические характеристики материалов модели (проверка геометрических размеров и веса материалов, испытание образцов материала для арок и прогонов на растяжение, испытание канатов (затяжек) на растяжение), экспериментально исследованы арки с лучевыми затяжками и арки без затяжек, проведена адаптация расчетных моделей по фактическим габаритам и физико-механическим характеристикам экспериментальной модели, осуществлено сравнение и анализ экспериментальных и расчетных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент покрытия в виде трех арочных комбинированных систем (рис. 1). Арки объединены в пространственный блок с помощью прогонов и связей. Габариты физической модели были подобраны по исходной расчетной модели арки с лучевыми затяжками, в которой пролет арки составлял 30 м, шаг арок — 6 м, стрела подъема — четверть пролета, т.е. 7,5 м [13, 26]. В исходной расчетной модели принято 8 панелей, 8 затяжек, пояс арки жесткий полигональный кругового очертания. Опоры шарнирно-непод-

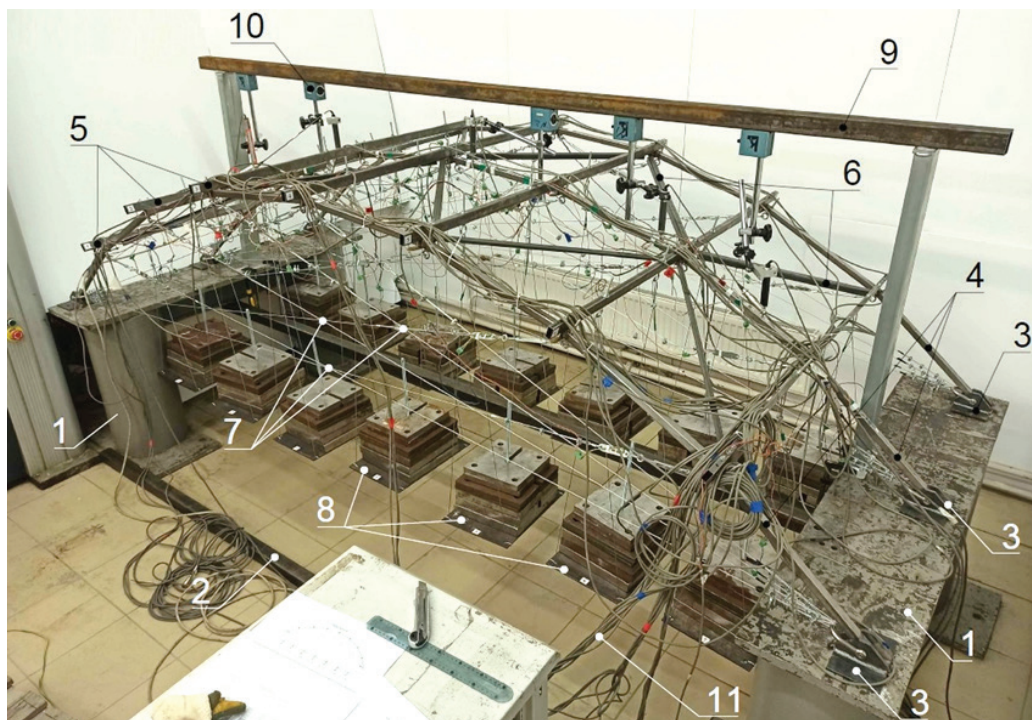


Рис. 1. Экспериментальная модель: 1 — металлические опоры; 2 — вспомогательные балки; 3 — опорный узел; 4 — арки; 5 — прогоны; 6 — связи; 7 — затяжки; 8 — грузовые площадки с грузами; 9 — вспомогательная балка для фиксации прогибомеров; 10 — прогибомеры; 11 — провода для подключения тензорезисторов к тензостанции

Fig. 1. Experimental model: 1 — metal pole; 2 — auxiliary beam; 3 — bearing joint; 4 — arches; 5 — girders; 6 — lacing; 7 — ties; 8 — load boards with loads; 9 — auxiliary beam for fixing deflection meters; 10 — deflectometer; 11 — wires for connecting strain gauges to the strain gauge station

Табл. 1. Усилия преднапряжения в затяжках центральной арки

Table 1. Prestressing forces in the central arch ties

Номер затяжки Tie number	1	2	3	4	5	6	7	8
Требуемое преднапряжение, кН Required prestress, kN	0,45	0,30	0,45	0,55	0,55	0,45	0,30	0,45
Заданное преднапряжение, кН Set prestress, kN	0,40	0,31	0,47	0,58	0,53	0,43	0,28	0,38

вижные, нумерация затяжек представлена на рис. 2, а исходное преднапряжение затяжек — в табл. 1. Пояс арки выполнен из квадратной трубы 200 × 6 мм по ГОСТ 30245², к нему закреплены восемь затяжек из стального троса диаметром Ø14 мм по ГОСТ 3064³, сечение однопролетных разрезных прогонов и крестовых связей выполнено из квадратной трубы 250 × 8 мм и 120 × 4 мм согласно ГОСТ 30245².

В соответствии с основными типами подобия экспериментальных моделей строительных конструкций и с учетом габаритов помещений лаборатории было принято смешанное подобие физической модели [27] с геометрическим масштабом 10:1. Для выбранного вида подобия характерно следующее: габаритные размеры и сечения элементов физической и численной модели геометрически подобны, подобные граничные условия, качественно и количественно подобны воздействия, материалы одинаковы, все безразмерные величины (относительные деформации, коэффициент Пуассона и т.п.) и масштабные коэффициенты величин с одинаковой размерностью равны. При заданном критерии подобия для физической модели требовались сечения пояса арок 20 × 20 × 0,6 мм, Ø затяжек — 1,4 мм, прогонов 25 × 25 × 0,8 мм и связей 12 × 12 × 0,4 мм. Однако из-за ограниченных типоразмеров в соответствующих аналогичных ГОСТах и отсутствия наличия у поставщиков требуемых типоразмеров элементов модели потребовалась корректировка физической модели по существующему размеру металлопроката и тросов. При изготовлении поясов арок необходима точность при нарезании панелей до десятых долей миллиметра и сварка поясов с использованием шаблона, но доступна была точность изготовления до 1 мм и сварка на сварочном столе. Поэтому пролет физической модели составил 3,113 м вместо 3 м (относительная погрешность 3,8 %), стрела подъема получилась равной 0,653 м вместо 0,6 м (относительная погрешность 7,2 %). Требовалась корректировка численной модели из-за полученной разницы фактических размеров с теоретическими. Пояс арки физической модели выполнен из квадратной трубы 20 × 1 мм

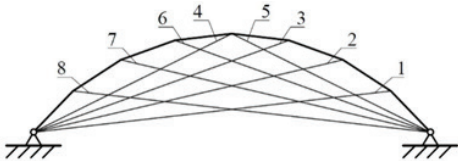


Рис. 2. Нумерация затяжек

Fig. 2. Numbering of ties

(ГОСТ 8639–82⁴), затяжки — из стального троса диаметром Ø2 мм (DIN 3055⁵), сечение однопролетных разрезных прогонов — из прямоугольной трубы 20 × 15 × 1 (ГОСТ 8645⁶), связи — из равнополочного уголка 20 × 2 мм (ГОСТ 8509⁷).

Предварительное натяжение в затяжках было задано с помощью талрепов, а измерение заданного преднапряжения выполнено с помощью заранее оттарированных металлических пластин с размещенными на них тензорезисторами. Посредством карабинов пластина закреплялась к затяжке и талрепу, который соединял затяжку с поясом арки через рым-болт (рис. 3). Тарирование пластин заключалось в нагружении и разгрузке каждой пластины до 2000 Н по 3 раза на универсальной электромеханической машине (Instron 3382, производитель Instron Corporation, Норвуд, Массачусетс, США). По результатам тарирования для каждой пластины по линии тренда были получены коэффициенты линейного графика зависимости усилий от относительных деформаций (рис. 4). Полученные коэффициенты для преобразования измеренных относительных деформаций в металлические пластинах в усилия введены в программное обеспечение для тензостанций. При проведении эксперимента оператор мог в режиме реального времени наблюдать величины заданных усилий преднапряжения в затяжках.

Для загрузки физической модели были изготовлены площадки для опирания грузов (рис. 1). Площадки подвешены к прогонам в двух точках.

⁴ ГОСТ 8639–82. Трубы стальные квадратные. Сортамент (с Изменениями № 14). 2006. 8 с.

⁵ DIN 3055. Drahtseile aus Stahldrehten. Rundlitzenseil 6 × 7. 1972.

⁶ ГОСТ 8645–68. Трубы стальные прямоугольные. Сортамент. 2004. 18 с.

⁷ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. 2005. 10 с.

² ГОСТ 30245–2012. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. 2014. 42 с.

³ ГОСТ 3064–80. Канат одинарной свивки типа ТК конструкции 1 × 37 (1 + 6 + 12 + 18). 2014. 11 с.

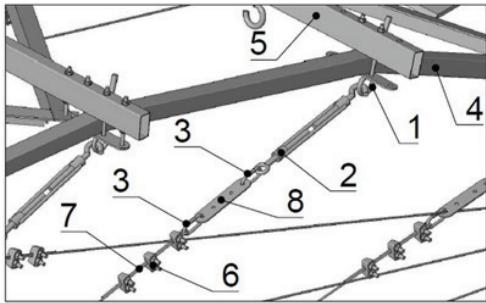


Рис. 3. Узел примыкания затяжек к поясу арок: 1 — рым-болт Ø6 мм; 2 — талреп Ø6 мм; 3 — карабин с муфтой Ø3 мм; 4 — пояс арки; 5 — прогон; 6 — зажим для каната Ø3 мм; 7 — затяжка Ø2 мм; 8 — металлическая пластина 80 × 17 × 1,5 мм

Fig. 3. The junction of the ties to the arch belt: 1 — ring-bolt Ø6 mm; 2 — strut Ø6 mm; 3 — carabiner with coupling Ø3 mm; 4 — arch belt; 5 — girder; 6 — rope clamp Ø3 mm; 7 — tie Ø2 mm; 8 — metal plate 80 × 17 × 1.5 mm

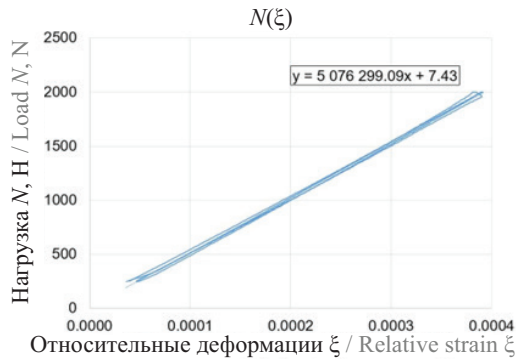


Рис. 4. График зависимости нагрузки от относительных деформаций на примере одной из 24 пластин

Fig. 4. Graph of load versus relative deformation using the example of one of 24 plates

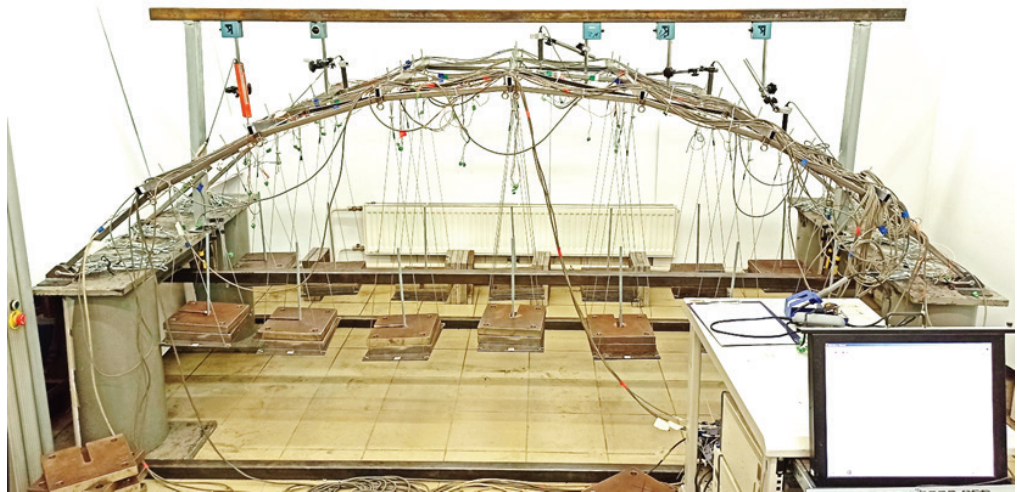


Рис. 5. Экспериментальная модель без затяжек

Fig. 5. Experimental model without ties

Таким образом, суммарная распределенная по длине прогона нагрузка от веса покрытия и снеговой загрузки преобразована в две сосредоточенные нагрузки с учетом масштабных коэффициентов. В качестве грузов использованы металлические пластины 24 × 24 × 3 см весом 12,556 кг. Арка с затяжками и арка без затяжек испытаны при равномерно распределенной нагрузке. На каждую грузовую площадку поэтапно были размещены по две пластины (рис. 5), суммарная нагрузка на экспериментальную модель составила 4,015 кН (401,5 кг). На каждом этапе выполнялась фиксация показаний тензорезисторов и прогибомеров в течение 5 мин с частотой 1 Гц. Информация передавалась на компьютерную станцию обработки данных, а далее экспортировалась в виде таблиц MS Excel.

Для последующего сравнения экспериментальных данных с результатами расчетов принята разница показаний тензорезисторов между последним этапом загрузки (совместное действие собственного веса, преднапряжения, веса грузовых площадок и всех грузов) и нулевым (совместное действие собственного веса и преднапряжения). Относительные деформации, полученные с применением тензорезисторов, преобразованы в нормальные напряжения с помощью модуля упругости.

При численном и экспериментальном исследовании акцент сделан на изучение работы комбинированной арочной конструкции в своей плоскости. На рис. 6 изображена схема размещения тензорезисторов для металла с базой 5 мм (марка FLA-5-11, производитель Tokyo Measuring Instruments Lab, Токио, Япония) и прогибомеров (тензометрические датчики линейных перемещений CDP-25, 89248-23, производитель Tokyo Measuring Instruments Lab, Токио, Япония) на поясе арки. Фиксация показаний 28 тензорезисторов на поясе арке, 24 тензорезисторов на металлических пластинах затяжек и 5 прогибомеров выполнена с по-

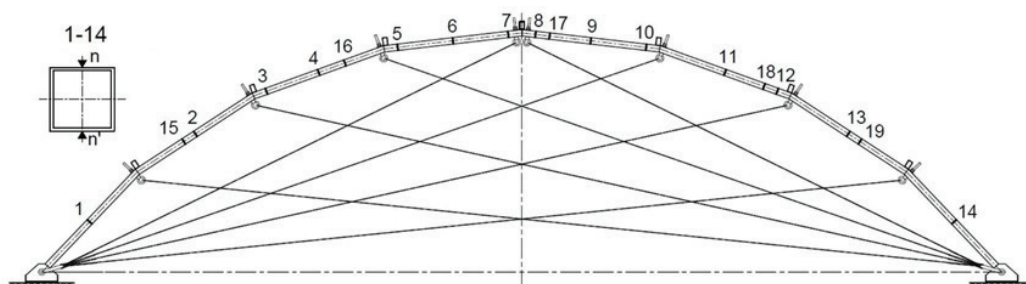


Рис. 6. Схема размещения тензорезисторов (сечения 1–14) и прогибомеров (15–19) на поясе центральной арки
Fig. 6. Layout of strain gauges (sections 1–14) and deflectometers (15–19) on the belt of the central arch

мощью двух тензостанций (модель SCXI-1001, производитель National Instruments, Будапешт, Венгрия). После подключения всех резисторов и прогибомеров к тензостанциям было задано преднапряжение всем затяжкам в последовательности: 4 и 5, 1 и 8, 3 и 6, 7 и 2 (рис. 2). Сначала задавалось преднапряжение всем затяжкам в центральной арке, после чего задано преднапряжение всем затяжкам крайних арок. Далее проводилась корректировка заданного преднапряжения сначала в центральной арке, а потом корректировалось преднапряжение в крайних арках до получения значений преднапряжения, близких к требуемым (табл. 1). При установке тензорезисторов на пояс арки на конструкцию уже оказывает влияние собственный вес. При задании или корректировке преднапряжения затяжек заданные значения в каждом нагружении незначительно отличались (табл. 1).

Физико-механические характеристики материалов модели определены по стандартным методикам. Проверка размеров образцов выполнена по требованиям ГОСТ 8639⁴ и ГОСТ 13663⁸, проверка веса образцов осуществлена взвешиванием на электронных весах (модель M-ER 326AFV LED, производитель Mercury WP Tech Group Co. LTD, Инчон, Южная Корея). Определение пределов пропорциональности и текучести, временного сопротивления, модуля упругости металла труб произведено по требованиям и методикам ГОСТ 535⁹, ГОСТ 7564¹⁰, ГОСТ 10006–80¹¹, ГОСТ 1497¹², ГОСТ 13663⁸. Установление модуля упругости и разрывного усилия проведено по тре-

бованиям и методикам ГОСТ 3241¹³ и руководства по применению стальных канатов¹⁴. Испытания образцов из труб и канатов выполнены на универсальной электромеханической машине Instron 3382.

Адаптированные численные модели построены по фактическим габаритам физической модели. В моделях задача решена в пространственной постановке с учетом геометрически нелинейного характера работы. Арки, связи, прогоны и затяжки изготовлены в виде стержневых конечных элементов № 310 (универсальный геометрически нелинейный стержень), размеры конечных элементов $\approx 0,05$ м. Пояс арки жесткий, сопряжение связей с прогонами шарнирное, сопряжение прогонов с арками жесткое. Физико-механические характеристики материалов модели приняты по результатам экспериментальных исследований. Схемы нагружений, точки приложения нагрузки, их значения соответствуют экспериментальной модели. Заданное перед испытаниями преднапряжение в расчетных моделях реализовано с помощью задания температурных нагрузок на затяжки по формуле:

$$T = \frac{N}{A \cdot \alpha \cdot E},$$

где T — требуемая температура; N — заданное усилие преднапряжения; A — расчетная площадь сечения всех проволок; α — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости стального каната.

В качестве значений для сравнения с экспериментальными данными принята разница значений нормальных напряжений и перемещений, полученных в первом (совместное действие собственного веса, преднапряжения, веса грузовых площадок и грузов) и втором сочетаниях нагрузок (совместное действие собственного веса и преднапряжения). Нормальные напряжения в сечениях расчетных моделей получены в системе «Конструктор сечений» с помощью импорта полученных в ПК ЛИРА-САПР усилий (рис. 7).

⁸ ГОСТ 13663–86. Трубы стальные профильные. Технические требования. 2001. 8 с.

⁹ ГОСТ 535–2005. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. 2009. 19 с.

¹⁰ ГОСТ 7564–97. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний. 2009. 19 с.

¹¹ ГОСТ 10006–80 (ИСО 6892–84). Трубы металлические. Метод испытания на растяжение (с Изменениями № 3, 4). 2010. 12 с.

¹² ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892–84, СТ СЭВ 471–88). Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Поправками и Изменениями № 1, 2, 3). 2008. 20 с.

¹³ ГОСТ 3241–91. Канаты стальные. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3). 2008. 17 с.

¹⁴ Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений. М. : Стройиздат, 1978. 96 с.

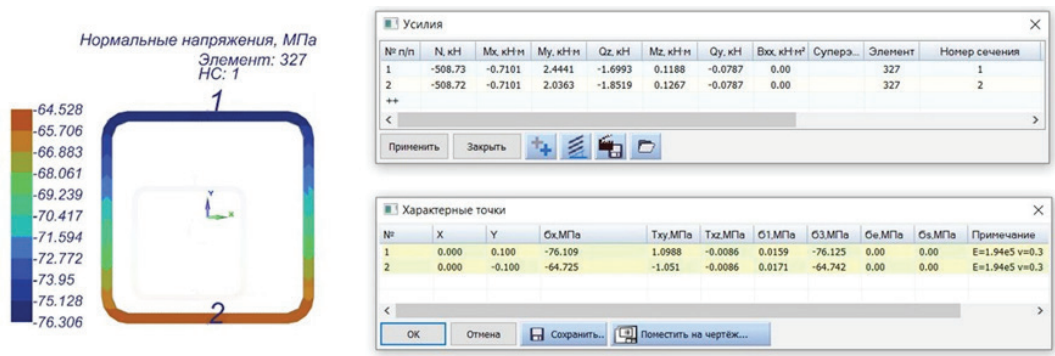


Рис. 7. Расчет нормальных напряжений в сечениях модели в системе «Конструктор сечений»

Fig. 7. Calculation of normal stresses in model sections in the “Section Designer” system

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проверки размеров образцов профилей и определения физико-механических характеристик модели установлено следующее: размеры образцов не превышают предельные отклонения, однако вес профилей для пояса арки меньше на 9,8 %, чем в ГОСТ 8639⁴, а для прогонов на 8,9 % меньше, чем в ГОСТ 8645⁶; среднеарифметическое значение предела текучести σ_m для образцов материала пояса арки и прогонов составляет 355 и 279 Н/мм², а временное сопротивление σ_{max} 371 и 330 Н/мм²; среднеарифметическое значение модуля упругости каната $E = 144\,393$ Н/мм²; среднеарифметическое максимальное усилие разрыва образцов каната 3137 Н. Материал пояса арок соответствует марке стали Ст3 (ГОСТ 13663⁸), для которой $\sigma_m \geq 216$ Н/мм², $\sigma_{max} \geq 353$ Н/мм², а материал прогонов соответствует марке стали Ст2, для которой $\sigma_m \geq 206$ Н/мм², $\sigma_{max} \geq 333$ Н/мм². Модуль упругости для материала пояса арок принят $E = 194\,000$ Н/мм², для материала прогонов — $E = 198\,000$ Н/мм² [28]. Фактическое усилие разрыва каната больше, чем минимальное (2350 Н) и расчетное усилие разрыва (2610 Н) (DIN 3055⁵). Используемый трос соответствует стандарту DIN 3055⁵.

Вес модели покрытия без затяжек и с затяжками без учета метизов составляет 15,246 и 16,055 кг соответственно, с учетом метизов — 17,483 и 20,836 кг соответственно (в приведенные массы моделей не входит вес опорных плит с траверсами и такелажных скоб). Таким образом, в расчетных моделях при задании собственного веса был задан коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,15$ для модели без затяжек и $\gamma_f = 1,3$ для модели с затяжками.

На рис. 8, 9 показаны расчетные (синим цветом) и экспериментальные (красным цветом) значения нормальных напряжений и вертикальных перемещений, полученных на последнем этапе загрузки. Анализ данных позволяет заключить, что максимальные значения напряжений в арке с лучевыми затяжками уменьшаются в 2–3 раза в сравнении с аркой без затяжек, также в арке с лучевыми затяжками распределены равномернее (рис. 10). Деформа-

ции арки с лучевыми затяжками в середине пролета в 3 раза меньше в сравнении с аркой без затяжек.

В арке с затяжками меньше точек, попадающих в диапазон отклонения не более 20 % и выходящих за диапазон отклонения более 40 % (рис. 11, табл. 2). Расчетная модель арки без затяжек адекватно описывает поведение экспериментальной модели, однако в точках, где напряжения по модулю менее 10 Н/мм², наблюдается большое расхождение расчетов с экспериментом. В расчетной модели арки с лучевыми затяжками в сравнении с экспериментальными значениями отмечается больший разброс значений, но почти все точки находятся в пределах выделенных отклонений. При попытке нагружения арки без затяжек третьей грузовой пластиной наблюдалось визуально заметное деформирование арки (более 20 мм) в момент возникновения асимметричности нагрузки, в связи с этим нагружение третьей пластиной не использовалось. Данная попытка показала, что для арки без затяжек суммарная нагрузка более 4,015 кН может привести к наступлению второго предельного состояния (прогиб более 20,5 мм для арки пролетом 3,113 м), в то время как в арке с лучевыми затяжками при суммарной нагрузке 9,043 кН (рис. 1) максимальный прогиб составил 5,6 мм.

Разница в значениях расчетных и экспериментальных напряжений и деформаций могла возникнуть вследствие следующих факторов: каждая арка физической модели имеет небольшую разницу в геометрических размерах, а для расчетной модели были приняты одинаковые усредненные значения геометрических размеров для всех трех арок; в расчетных моделях не учитываются отверстия в арках и податливость в соединениях, которая возникает из-за использования талрепов, карабинов, зажимов, рым-болтов в затяжках и хомутов для закрепления прогонов к поясам арок; в расчетных моделях не учтен вес проводов, которые соединяют тензорезисторы с тензостанцией и закреплены на прогонах и центральной арке; в расчетных моделях применяется среднеарифметический вес металлических грузовых пластин, но их вес имеет разброс 0,144 кг, что составляет 1,2 %; косвенный тензометрический метод измерения заданного затяжкам

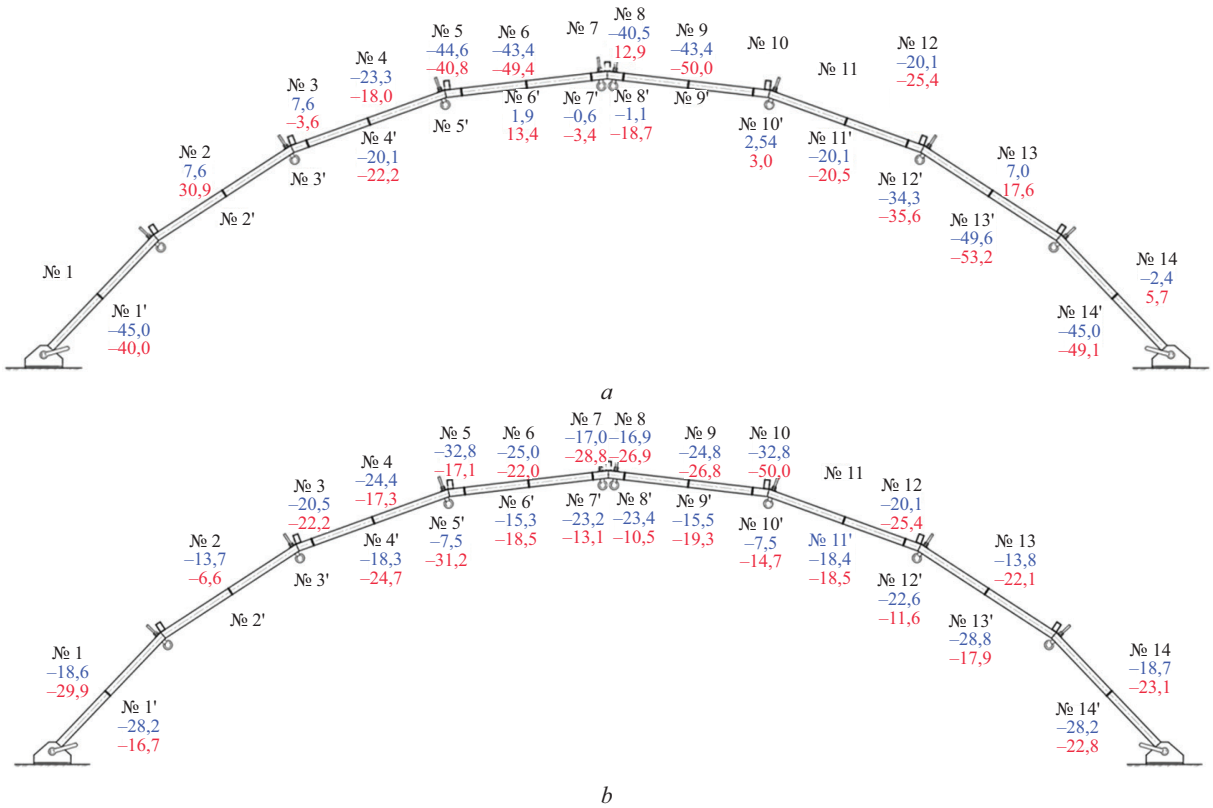


Рис. 8. Нормальные напряжения в сечениях арки, Н/мм²: *a* — арка без затяжек; *b* — арка с затяжками (затяжки условно не показаны)

Fig. 8. Normal stresses in arch sections, N/mm²: *a* — arch without a tie; *b* — arch with a tie

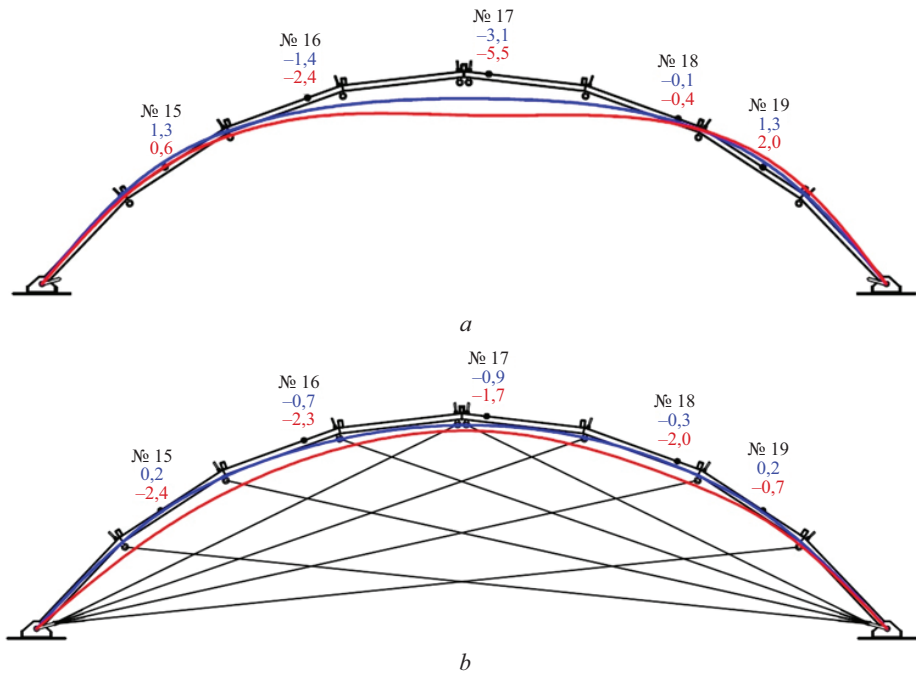


Рис. 9. Деформированная схема и вертикальные перемещения, мм: *a* — арка без затяжек; *b* — арка с затяжками

Fig. 9. Deformed pattern and vertical movements, mm: *a* — arch without ties; *b* — arch with ties

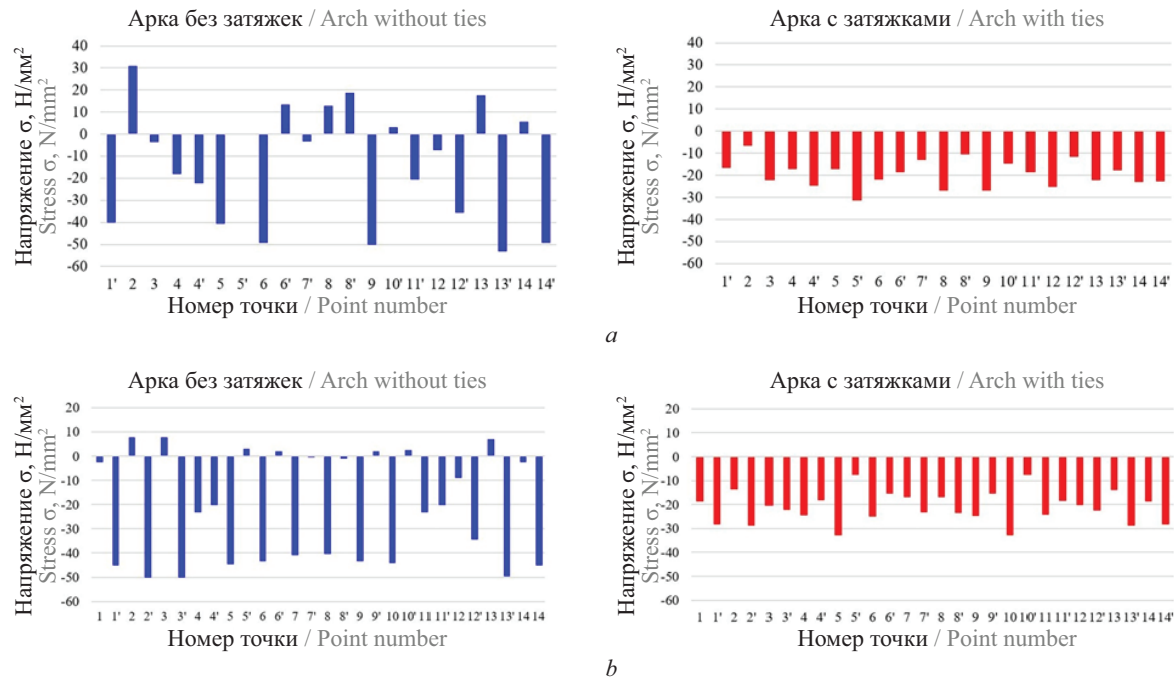


Рис. 10. Нормальные напряжения, Н/мм², в сечениях арки без затяжек (синим цветом) и арки с затяжками (красным цветом): а — экспериментальные значения; б — расчетные значения

Fig. 10. Normal stresses, N/mm², in the sections of the arch without ties (blue values) and the arch with ties (red values): a — experimental values; b — calculated values

преднапряжения. В целом поведение модели под нагрузкой соответствует физике процесса.

Полученные результаты подтверждают преимущества комбинированных систем, перечисленных в статьях [8, 10, 11], а именно то, что комбинирован-

ные арочно-вантовые конструкции имеют большую несущую способность, меньшую деформативность, меньшие напряжения при равных нагрузках в сравнении с простыми арками. Равномерное распределение напряжения и малая деформативность позво-

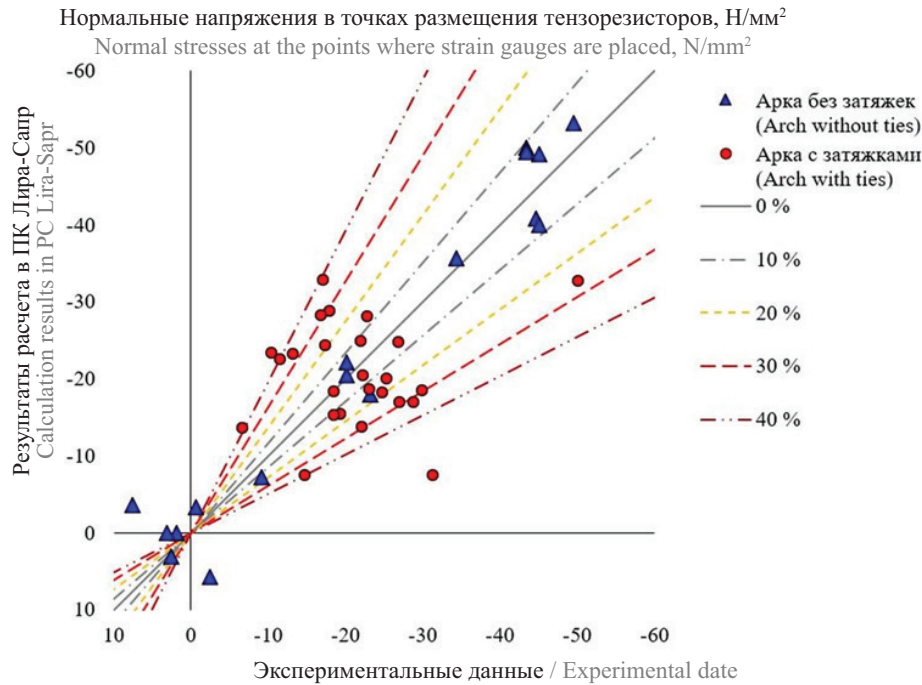


Рис. 11. График соответствия экспериментальных данных и результатов расчета

Fig. 11. Graph of correspondence between experimental data and calculation results

Табл. 2. Количество значений нормальных напряжений в арке (в процентах), попадающих в соответствующий диапазон отклонений

Table 2. The number of normal stress values in the arch (in percent) falling within the corresponding deviation range

Отклонение, % Deviation, %	Процент точек, имеющих отклонение Percentage of points having deviation	
	Арка без затяжек Arch without ties	Арка с затяжками Arch with ties
≤10	43	16
≤20	57	40
≤30	–	64
≤40	–	88
>40	43	12

ляют реализовать рациональное по металлоемкости конструктивное решение [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При выборе и задании критериев подобия расчетных и физических моделей важно отталкиваться не только от основных габаритов расчетной модели, но и от размеров профилей, доступных для изготовления физической модели. Для минимизации погрешностей в размерах конструкции предпочтительнее заводское изготовление экспериментальных моделей. Описанный способ нагружения схемы путем подвешивания грузовых площадок к прогонам удобен в использовании, но увеличивает время проведения каждого этапа загрузки в связи с необходимостью останавливать колебательные движения грузовых площадок.

Для точного определения преднапряжения в затяжках желательно использовать S-образные датчики измерения растяжения. Тензометрический метод через растяжение металлической пластины также позволяет выполнить преднапряжение до требуемых значений, однако необходимо принимать металлическую пластину, близкую по площади поперечного сечения к площади натягиваемого троса, для повышения точности измерений тензометрическим методом. При измерении преднапряжения в лучевых затяжках тензометрическим методом следует располагать металлические пластины в экспериментальной схеме так, чтобы они не попадали в точки пересечения затяжек.

При задании собственного веса конструкций каркаса в виде комбинированных арочных систем с затяжками требуется уточнять коэффициент надежности по нагрузке, так как вес метизов может превы-

шать запас в 5 % (СП 20.13330¹⁵) от веса основного каркаса. Для рассмотренных в статье экспериментальных моделей вес метизов составил 15 % от веса основного каркаса для покрытия с арками без затяжек и 30 % для арки с затяжками.

Арка с лучевым затяжками дает возможность выравнивать значения напряжений в поясе арки в сравнении с аркой без затяжек, а также снизить максимальные значения напряжений в 2–3 раза и деформации в середине пролета арки в 3 раза. Расчетная модель арки без затяжек лучше описывает поведение экспериментальной модели в сравнении с аркой с затяжками, причины возникших отклонений в арке с затяжками описаны выше. Арка с лучевыми затяжками имеет большую несущую способность и малую деформативность в сравнении с аркой без затяжек.

Разница в значениях напряжений и перемещений может возникать вследствие следующих факторов: разница в геометрических размерах трех арок, отсутствие учета отверстий и податливости в соединениях (идеализация расчетной модели), отсутствие учета веса проводов, использование усредненного веса грузовых пластин, использование косвенного (тензометрического метода) для задания преднапряжения затяжкам.

Для экспериментального исследования была разработана, изготовлена и испытана масштабная модель фрагмента покрытия в виде арок без затяжек и с лучевыми затяжками. Проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами численных расчетов. Масштабная модель качественно и адекватно отражает физику рассмотренных процессов.

¹⁵ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М., 2018. 78 с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суворовцев Б.А. Особенности проектирования пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 219–224. EDN YKRLYD.
2. Юнусов А.С. Арочные конструкции, востребованные временем, в строительной науке и архитекту-

ре // Инженерный вестник Дона. 2016. № 1 (40). С. 44. EDN WCNSXV.
3. Arslan A. Bridges as City Landmarks: A Critical Review on Iconic Structures // Journal of Design Studio. 2020. Pp. 85–99. DOI: 10.46474/798072
4. Danciu A.D., Guțiu Ș.I., Moga C., Dragomir M.L., Ciotlăuș M., Marusceac V. A Review of the Net-

work Arch Bridge // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 19. P. 10966. DOI: 10.3390/AP131910966

5. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 308. P. 118026. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118026

6. Li Y., Lai Y., Lu G., Yan F., Wei P., Xie Y.M. Innovative design of long-span steel–concrete composite bridge using multi-material topology optimization // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 269. P. 114838. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114838

7. Xie X.L., Huang Y., Qin X. Conceptual design of a new type of single-tower cable-stayed arch bridge and study of its mechanical properties // *Advances in Structural Engineering*. 2021. Vol. 24. Issue 11. Pp. 2500–2511. DOI: 10.1177/13694332211001506

8. Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Долгушева В.В. Проблемы применения и проектирования арочных комбинированных систем // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 2. С. 25–35. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.25. EDN PKRRXZ.

9. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures: A History of Empiricism and Science // *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. Cottbus, 2009. P. 267274.

10. Трянина Н.Ю., Тестоедов П.С. Исследование вопроса живучести стальных сетчатых покрытий // *Приволжский научный журнал*. 2015. № 1 (33). С. 9–14. EDN TMJZXV.

11. Трянина Н.Ю., Карзанов М.А. Исследование работы арочных конструкций с системой наклонных тяг // *Приволжский научный журнал*. 2011. № 2 (18). С. 16–19. EDN NURPZJ.

12. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Operation Analysis of the Main Arch-Cable-Stayed Systems When Operating Under Unevenly Distributed and Asymmetrically Working Loads // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Pp. 44–54. DOI: 10.1007/978-3-030-91145-4_5

13. Долгушева В.В., Ибрагимов А.М., Долгушев Т.В. Рациональное конструктивное решение комбинированной арочной системы с наклонными тягами // *Academia. Архитектура и строительство*. 2023. № 2. С. 168–174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR.

14. Guo X., Li Q., Zhang D., Gong J. Structural Behavior of an Air-Inflated Fabric Arch Frame // *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. Issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001374

15. Alegria Mira L., Thrall A.P., De Temmerman N. Deployable scissor arch for transitional shelters // *Automation in Construction*. 2014. Vol. 43. Pp. 123–131. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.03.014

16. Trenz J., Zlatuška K., Necas R. Experimental model of plan curved footbridge supported by arch // *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 960. Issue 4. P. 042070. DOI: 10.1088/1757-899x/960/4/042070

17. Han Q.H., Xu Y., Lu Y., Xu J., Zhao Q.H. Failure mechanism of steel arch trusses: Shaking table testing and FEM analysis // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 82. Pp. 186–198. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.013

18. Clarke M.J., Hancock G.J. Tests and Nonlinear Analyses of Small-Scale Stressed-Arch Frames // *Journal of Structural Engineering*. 1995. Vol. 121. Issue 2. Pp. 187–200. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(187)

19. Misseri G., Rovero L., Stipo G., Barducci S., Alecci V., De Stefano M. Experimental and analytical investigations on sustainable and innovative strengthening systems for masonry arches // *Composite Structures*. 2019. Vol. 210. Pp. 526–537. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.054

20. Lu P., Zhang J., Li D., Zhou Y., Shi Q. Conceptual design and experimental verification study of a special-shaped composite arch bridge // *Structures*. 2021. Vol. 29. Pp. 1380–1389. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.018

21. Ferrero C., Calderini C., Roca P. Experimental response of a scaled dry-joint masonry arch subject to inclined support displacements // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 253. P. 113804. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113804

22. Mentese V.G., Gunes O., Celik O.C., Gunes B., Avsin A., Yaz M. Experimental collapse investigation and nonlinear modeling of a single-span stone masonry arch bridge // *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 152. P. 107520. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107520

23. Liu A.R., Huang Y.H., Fu J.Y., Yu Q.C., Rao R. Experimental research on stable ultimate bearing capacity of leaning-type arch rib systems // *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 114. Pp. 281–292. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.011

24. Mora-Gómez J. Historical iron tie-rods in vaulted structures: parametrical study through a scaled model // *WIT Transactions on The Built Environment*. 2015. Vol. 1. Pp. 669–680. DOI: 10.2495/STR150561

25. Киселёв Д.Б. Работа комбинированной арочной системы с учетом геометрической нелинейности и последовательности монтажа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 120 с.

26. Dolgusheva V., Ibragimov A., Dolgushev T. Robustness of the combined arch system with radial ties // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 389. P. 01053. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901053

27. Еремеев П.Г. Справочник по проектированию современных металлических конструкций больших пролетных покрытий. М. : Ассоциация строительных вузов, 2011. 256 с. EDN QNPJIX.

28. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. М., 2014. 1215 с.

Поступила в редакцию 18 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 18 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Вера Витальевна Долгушева** — преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Александр Майорович Ибрагимов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022; igasu_alex@mail.ru.

Вклад авторов:

Долгушева В.В. — разработка программы и методики экспериментального исследования, подготовка и проведение экспериментального исследования, выполнение и анализ расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Ибрагимов А.М. — научное руководство, участие в разработке и реализации эксперимента, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Surovtcev B.A. Designing specialities of the combined bridge arch superstructures with inclined hangers — “Network arches”. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2017; 1(53):219-224. EDN YKRLYD. (rus.).
2. Yunusov A.S. Arch designs demanded by the time in building sciences and architecture. *Engineering Journal of Don*. 2016; 1(40):44. EDN WCNSXV. (rus.).
3. Arslan A. Bridges as City Landmarks: A Critical Review on Iconic Structures. *Journal of Design Studio*. 2020; 85-99. DOI: 10.46474/798072
4. Danciu A.D., Guțiu Ș.I., Moga C., Dragomir M.L., Ciotlăuș M., Marusceac V. A Review of the Network Arch Bridge. *Applied Sciences*. 2023; 13(19):10966. DOI: 10.3390/AP131910966
5. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics. *Engineering Structures*. 2024; 308:118026. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118026
6. Li Y., Lai Y., Lu G., Yan F., Wei P., Xie Y.M. Innovative design of long-span steel-concrete composite bridge using multi-material topology optimization. *Engineering Structures*. 2022; 269:114838. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114838
7. Xie X.L., Huang Y., Qin X. Conceptual design of a new type of single-tower cable-stayed arch bridge and study of its mechanical properties. *Advances in Structural Engineering*. 2021; 24(11):2500-2511. DOI: 10.1177/13694332211001506
8. Ibragimov A.M., Gnedina L.Iu., Dolgusheva V.V. Problems of application and design of combined arc systems. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2021; 2:25-35. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.25. EDN PKRRXZ. (rus.).
9. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures: A History of Empiricism and Science. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. Cottbus, 2009; 267274.
10. Tryanina N.E., Testodov P.S. The investigation of the survivability problems of steel mesh enclosures. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2015; 1(33):9-14. EDN TMJZXV. (rus.).
11. Tryanina N.Yu., Karzanov M.A. Study of the work of arched structures with a system of inclined rods. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2011; 2(18):16-19. EDN NURPZJ. (rus.).
12. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Operation Analysis of the Main Arch-Cable-Stayed Systems When Operating Under Unevenly Distributed and Asymmetrically Working Loads. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 44-54. DOI: 10.1007/978-3-030-91145-4_5
13. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M., Dolgushev T.V. Rational design concept of the combined arch system with inclined rods. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 2:168-174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR. (rus.).
14. Guo X., Li Q., Zhang D., Gong J. Structural Behavior of an Air-Inflated Fabric Arch Frame. *Journal of Structural Engineering*. 2015; 142(2). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001374
15. Alegria Mira L., Thrall A.P., De Temmerman N. Deployable scissor arch for transitional shelters. *Automa-*

tion in Construction. 2014; 43:123-131. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.03.014

16. Trenz J., Zlatuška K., Necas R. Experimental model of plan curved footbridge supported by arch. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 960(4):042070. DOI: 10.1088/1757-899x/960/4/042070

17. Han Q.H., Xu Y., Lu Y., Xu J., Zhao Q.H. Failure mechanism of steel arch trusses: Shaking table testing and FEM analysis. *Engineering Structures*. 2015; 82:186-198. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.013

18. Clarke M.J., Hancock G.J. Tests and Nonlinear Analyses of Small-Scale Stressed-Arch Frames. *Journal of Structural Engineering*. 1995; 121(2):187-200. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(187)

19. Misseri G., Rovero L., Stipo G., Barducci S., Alecci V., De Stefano M. Experimental and analytical investigations on sustainable and innovative strengthening systems for masonry arches. *Composite Structures*. 2019; 210:526-537. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.054

20. Lu P., Zhang J., Li D., Zhou Y., Shi Q. Conceptual design and experimental verification study of a special-shaped composite arch bridge. *Structures*. 2021; 29:1380-1389. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.018

21. Ferrero C., Calderini C., Roca P. Experimental response of a scaled dry-joint masonry arch subject to inclined support displacements. *Engineering Structures*. 2022; 253:113804. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113804

22. Mentese V.G., Gunes O., Celik O.C., Gunes B., Avsin A., Yaz M. Experimental collapse investigation and nonlinear modeling of a single-span stone masonry arch bridge. *Engineering Failure Analysis*. 2023; 152:107520. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107520

23. Liu A.R., Huang Y.H., Fu J.Y., Yu Q.C., Rao R. Experimental research on stable ultimate bearing capacity of leaning-type arch rib systems. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 114:281-292. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.011

24. Mora-Gómez J. Historical iron tie-rods in vaulted structures: parametrical study through a scaled model. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2015; 1:669-680. DOI: 10.2495/STR150561

25. Kiselev D.B. *Operation of a combined arched system taking into account geometric nonlinearity and installation sequence : dis. ... cand. tech. sci.* Moscow, 2009; 120. (rus.).

26. Dolgusheva V., Ibragimov A., Dolgushev T. Robustness of the combined arch system with radial ties. *E3S Web of Conferences*. 2023; 389:01053. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901053

27. Eremeev P.G. *The manual on designing of wide-span roofs modern metal structures*. Moscow, Association of construction universities, 2011; 256. EDN QNPJIX. (rus.).

28. Dragunov Yu.G., Zubchenko A.S., Kashirskiy Yu.V. *Brand of steels and alloys*. Moscow, 2014; 1215. (rus.).

Received June 18, 2024.

Adopted in revised form on June 18, 2024.

Approved for publication on October 28, 2024.

BIONOTES: Vera V. Dolgusheva — lecturer of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Alexander M. Ibragimov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022; igasu_alex@mail.ru.

Contribution of the authors:

Vera V. Dolgusheva — development of a program and methodology for experimental research, preparation and conduct of experimental research, execution and analysis of calculations, writing the source text, final conclusions.

Alexander M. Ibragimov — scientific supervision, participation in the development and implementation of the experiment, revision of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Изучение потерь напряжения в стеклопластиковой арматуре при релаксации и ползучести

Булат Шавкатович Умаров¹, Тагир Альмирович Зиннуров²

¹ *Татавтодор; г. Казань, Россия;*

² *Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Потери напряжений полимеркомпозитной арматуры в предварительно напряженном бетоне являются одной из основных проблем, влияющих на их трещиностойкость и жесткость. Однако на сегодняшний день данный вопрос изучен не в достаточной мере. Предложены методы определения потерь от релаксации стеклопластиковой арматуры, а также приведены экспериментальные исследования потерь напряжения в стеклопластиковой арматуре на разных уровнях начального натяжения. Результаты исследования показывают характер снижения усилий в стеклопластиковых стержнях, приведены зависимости потери напряжений с течением времени.

Материалы и методы. В качестве основы используются результаты анализа и систематического обобщения сведений, полученных из отечественных и зарубежных источников, посвященных вопросам потерь усилий в предварительно напряженных композитных стержнях от релаксации и ползучести. На базе результатов экспериментальных данных предложены логарифмические зависимости потерь напряжений с течением времени.

Результаты. В результате проведенного эксперимента удалось зафиксировать характер изменения усилий в предварительно напряженных стеклопластиковых стержнях. Для описания релаксационной составляющей потерь напряжений в стеклопластиковом стержне с течением времени хорошо подходит логарифмическая зависимость.

Выводы. В рамках научного исследования проведен анализ потерь предварительного напряжения стеклопластиковых стержней при релаксации. В настоящее время различными авторами предлагаются данные о потерях предварительного натяжения в различных полимеркомпозитных материалах, главным образом это арматура на основе углепластиковых и арамидных волокон, стержни на основе стеклянных волокон изучены не в полной мере.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимерная композитная арматура, стеклопластиковая арматура, потери предварительного натяжения, релаксация, ползучесть, предварительное напряжение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Умаров Б.Ш., Зиннуров Т.А. Изучение потерь напряжения в стеклопластиковой арматуре при релаксации и ползучести // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.50-59

Автор, ответственный за переписку: Булат Шавкатович Умаров, bulat.umar@gmail.com.

Study of stress loss in fibreglass reinforcement under relaxation and creep

Bulat Sh. Umarov¹, Tagir A. Zinnurov²

¹ *Tatavtodor; Kazan, Russian Federation;*

² *Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Stress loss of polymer-composite reinforcement in prestressed concrete is one of the main problems affecting their crack resistance and stiffness. However, to date this issue has not been sufficiently studied. The paper proposes methods for determining losses from relaxation of fibreglass reinforcement, and also provides experimental studies of stress losses in fibreglass reinforcement at different levels of initial tension. The results of the study show the nature of the reduction in forces in fibreglass rods, and the dependences of stress loss over time are also proposed.

Materials and methods. The results of the analysis and systematic synthesis of data obtained from domestic and foreign sources on the issues of force loss in prestressed composite rods from relaxation and creep are used as a basis. Based on the results of experimental data, logarithmic dependences of voltage losses over time are proposed.

Results. As a result of the experiment, it was possible to record the nature of the change in forces in prestressed fibreglass rods. A logarithmic dependence is well suited to describe the relaxation component of stress losses in a fibreglass rod over time.

Conclusions. The study of stress losses in fibreglass reinforcement during relaxation and creep showed that stress losses are most pronounced in the first days after tensioning the reinforcement, with a subsequent decrease in the rate of losses over time. Relaxation losses in fibreglass reinforcement were quantitatively determined based on the experiments conducted, which confirmed that the logarithmic dependence describes well the nature of stress losses in the material. The scientific novelty of the study lies in obtaining experimental data on the relaxation of reinforcement made of domestic fibreglass, which complements existing knowledge and allows us to clarify regulatory documents, such as CP 295.1325800.2017. The practi-

cal significance of the work lies in the fact that the results obtained allow us to predict the durability and performance characteristics of structures using fibreglass reinforcement, as well as make adjustments to existing engineering solutions to minimize stress losses. Recommendations for practice include the need for further research to refine the relaxation factors as a function of initial stress and to develop more accurate calculation methods for engineering applications.

KEYWORDS: polymer composite reinforcement, fibreglass reinforcement, stress losses, relaxation, creep, prestressing

FOR CITATION: Umarov B.Sh., Zinnurov T.A. Study of stress loss in fibreglass reinforcement under relaxation and creep. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):50-59. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.50-59 (rus.).

Corresponding author: Bulat Sh. Umarov, bulat.umar@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время объем производства полимерной композитной арматуры (АПК) увеличился, она стала доступной для строительства, однако на практике, особенно в ответственных конструкциях, работающих на растяжение, изгиб и другие сложные воздействия, широкого распространения не получила [1, 2].

Как уже отмечали многие авторы, основной недостаток АПК — низкий модуль упругости (50–60 ГПа) [3, 4], он ближе к бетону, чем к стали, что ведет к значительным деформациям и трещинообразованию бетонных конструкций [5, 6]. Для решения проблемы высокой деформативности пластикобетонных конструкций, армированных неоднородной и структурно сложной полимерной композитной арматурой, предлагается ее предварительное натяжение [7, 8]. Этот способ повышения жесткости изгибаемых элементов известен с 1936 г., широко применяется для натяжения рабочих стержней арматуры из высокопрочных сталей.

Потери напряжений в предварительно напряженном бетоне являются одной из ключевых проблем, влияющих на трещиностойкость, а следовательно, долговечность изгибаемой конструкции [9].

Композитные материалы, подвергающиеся постоянным с течением времени внутренним усилиям,

демонстрируют потери напряжения [10]. Согласно *Fib Bulletin* (2007)¹, релаксацию композитных стержней можно представить как разность между начальным и конечным уровнем усилия, полученного по результатам эксперимента, что для объективной оценки потребует не менее 1 млн ч. Для композитов общая релаксация развивается в результате релаксации смолы, релаксации волокон, а также выпрямления волокон. Исследователи отмечают, что скорость релаксации напряжения зависит от соотношения модулей упругости смолы и волокна, а также объемной доли полимерной матрицы. Процесс релаксации развивается с первых минут передачи начальной нагрузки на стержень, при этом она может увеличиваться под воздействием высоких температур [11].

Цель настоящей работы заключается в исследовании и уточнении параметров снижения усилий в стеклопластиковом стержне при релаксации и ползучести.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Релаксация композитного армирования, включая стеклопластиковую арматуру (GFRP), описывается

¹ Fib Federation International de beton fib 2007. Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. The International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2007.

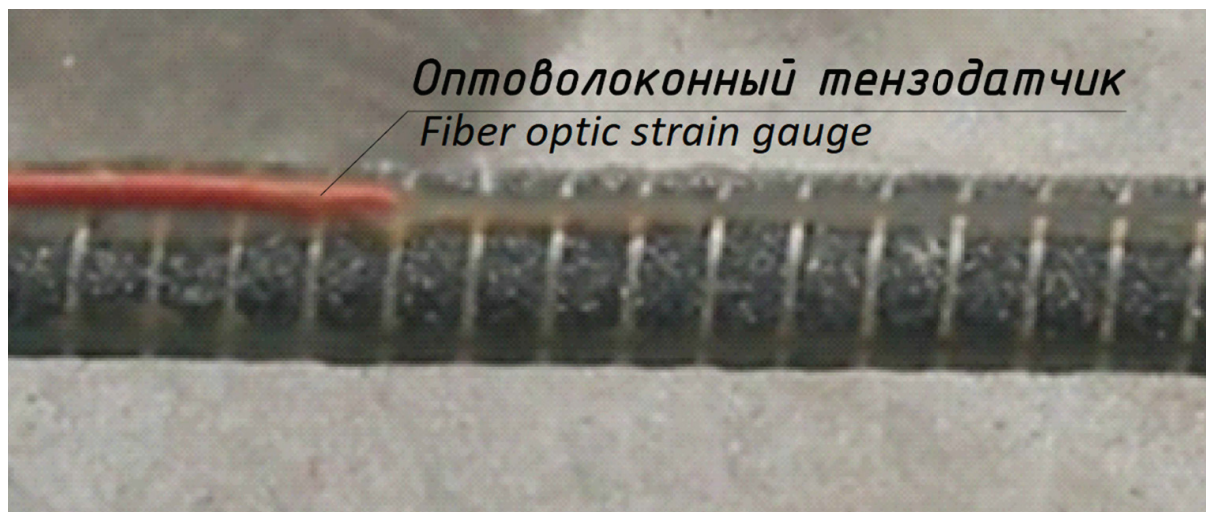


Рис. 1. Оптоволоконный тензодатчик, установленный на стержне

Fig. 1. Fibre optic strain gauge mounted on a rod

Табл. 1. Ослабление усилий в арматуре согласно Fib 2010²
Table 1. Reduction of forces in reinforcement according to Fib 2010²

Тип сухожилия Tendon type	Продолжительность Duration	
	1000 ч, % 1,000 h, %	50 лет (прогноз, %) 50 years (forecast, %)
Стеклопластик Fibreglass	1,8–2,0	4,0–14,0
Углепластик Carbon fibre	0,5–1,0	2,0–10,0
Арамид Aramid	5,0–8,0	11,0–25,0

в нескольких международных стандартах и рекомендациях. Вот некоторые из них:

1. ACI 440.4R-04 (American Concrete Institute).
Этот стандарт предоставляет рекомендации по использованию FRP (Fiber Reinforced Polymer) арматуры в предварительно напряженных бетонных конструкциях. В нем обсуждаются релаксационные характеристики композитной арматуры и предлагаются модели для оценки потерь напряжений в зависимости от времени и условий эксплуатации.
2. CSA S806 (Canadian Standards Association).
Канадский стандарт для проектирования и строительства с использованием композитных материалов. Документ охватывает аспекты, связанные с релаксацией и долгосрочной прочностью FRP арматуры. В нем также приведены методы расчета потерь напряжений из-за релаксации, учитывающие климатические условия.

3. fib Bulletin 40.
Норматив от International Federation for Structural Concrete (fib) содержит рекомендации по использованию FRP арматуры в бетонных конструкциях. В нем обсуждаются вопросы долговременной деформации и релаксации композитной арматуры, включая методики расчета и предсказания потерь напряжений.
4. ISO 10406-1:2015.

Стандарт ISO предоставляет общие требования к FRP арматуре для бетонных конструкций; охватывает различные аспекты поведения композитных материалов, включая релаксацию, и устанавливает требования к испытаниям и расчетам потерь напряжений.

5. Европейские стандарты (CEN).
В рамках европейских стандартов (например, EN 13706) обсуждаются общие свойства композитных материалов, включая релаксацию, хотя конкретные аспекты могут варьироваться в зависимости от применяемого материала и метода проектирования.

Эти нормы и стандарты предоставляют рекомендации для проектировщиков и инженеров, помогая учитывать релаксационные потери в композитной арматуре и обеспечивать долговечность конструкций. В работе Рингира и Зданович (2015) [11] отмечается, что тип армирующего волокна по-разному

способствует перераспределению напряжений в стержне. Они рекомендуют оценивать релаксацию при помощи зависимости:

$$REL3 = 0,231 + 0,345 \log(t),$$

где t — время в днях.

Как правило, арматура из углепластика не склонна к снижению напряжений со временем, потери достигают от 1 до 3 %, а арамидные и стеклянные волокна в стержнях, в свою очередь, могут демонстрировать релаксацию напряжения до 30 % в зависимости от технологии производства¹.

В документе ACI 440 4R-04³ значительная релаксация арамидных волокон описывается их ползучестью. Поскольку при изготовлении арматуры структура волокон непараллельна друг другу, во время ее натяжения происходит процесс, называемый выпрямлением волокна. Потери напряжений, вызванные этим явлением, зависят от скорости технологического процесса производства стержней и составляют от 1 до 2 % от начального напряжения [11].

Релаксация полимерной композитной арматуры также описывается в работе китайских исследователей Li Guo-wei, Pei Hua-Fu и Hong Cheng-yu [12], которые изучали релаксацию базальто-стеклопластиковых опесчаненных стержней больших диаметров. Особый интерес вызвала постановка эксперимента, изменения напряжений в натянутом стержне на жестких упорах фиксировались оптоволоконными тензодатчиками, установленными непосредственно на стержнях (рис. 1).

Результаты исследований показали, что значения релаксации напряжений за десять лет при начальном напряжении 30 % от предела прочности составляют 7,98 %, а наибольшие значения потерь проявляются в первые 7 дней после натяжения, затем скорость снижения напряжения становится меньше.

В работе чешских ученых 2008 г. Fornusek, Konvalinka и Sovják [13] исследовалась релаксация предварительно напряженных стеклопластиковых стержней, расположенных внутри бетонных изгибаемых конструкций. Напряжения в стержнях также фиксировались тензодатчиками, в ходе испытаний³ ACI440.4R-04. Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons. American Concrete Institute Committee Report, 2004.

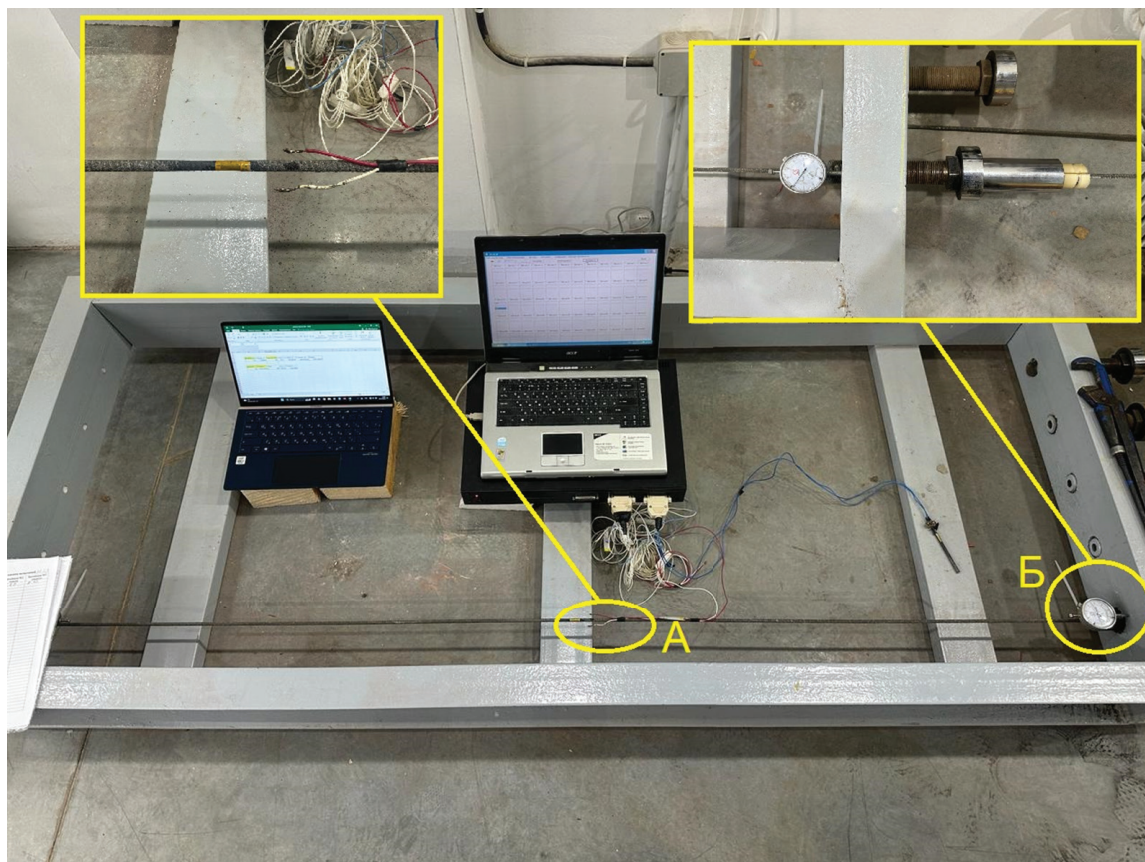


Рис. 2. Фиксация потерь напряжений в стеклопластиковой арматуре на испытательной раме: зона А — тензодатчик на стержне; зона Б — анкерное устройство с индикатором перемещений

Fig. 2. Recording stress losses in fibreglass reinforcement on the test frame: zone A — strain gauge on the rod; zone B — anchor device with displacement indicator



Рис. 3. Фиксация потерь напряжений в стеклопластиковой арматуре при подвешивании

Fig. 3. Fixing stress losses in fibreglass reinforcement when hanging

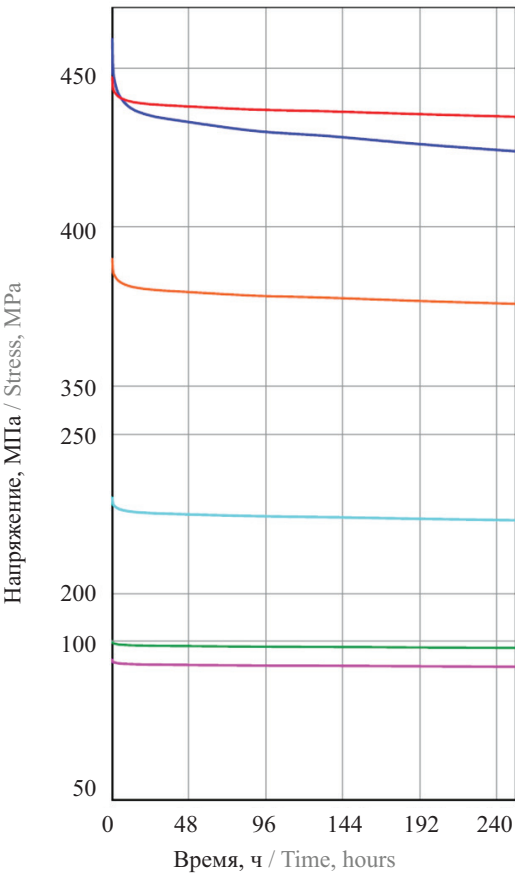


Рис. 4. Графики зависимости усилий в арматуре с течением времени

Fig. 4. Graphs of forces in reinforcement over time

наблюдалось резкое ослабление натяжения стержней из стеклопластика (табл. 1). В итоге потери напряжения в результате релаксации арматуры через первые 24 ч составили около 3,3 %, через 28 дней — 7,3 %, а в конце опыта через 132 дня — 10,5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Табл. 2. Результаты эксперимента оценки потерь напряжений в стеклопластиковых стрежнях

Table 2. Experimental results for assessing stress losses in fibreglass rods

Номер Number	Начальное напряжение, МПа Initial stress, MPa	Потери напряжения в стержне на 90 сут Tension loss in the rod at 90 days			Функция аппроксимации полученных значений снижения напряжений при эксперименте Approximation function of the obtained stress reduction values during the experiment
		общие, МПа general, MPa	от проскальзывания в анкерах, МПа slipping in anchors, MPa	от релаксации, МПа (отклонение от начального) relaxation, MPa (deviation from initial)	
1*	94	1,9	—	1,9 (2 %)	$f(x) = 94 - 0,239 \cdot \ln(x)$
2	100	4,37	2,36	2,01 (2 %)	$f(x) = 100 - 0,239 \cdot \ln(x)$
3	230	13,42	7,89	5,52 (2,4 %)	$f(x) = 230 - 0,799 \cdot \ln(x)$
4	390	105	92	13 (3 %)	$f(x) = 390 - 1,588 \cdot \ln(x)$
5	460	60,59	38,48	22,11 (4,8 %)	$f(x) = 460 - 3,974 \cdot \ln(x)$
6*	447	15,65	3,97	11,69 (2,6 %)	—

Анализ исследований показал недостаточную экспериментальную базу по изучению потерь напряжений в стеклопластиковых стержнях, некоторые эксперименты имеют довольно большие расхождения, поэтому было решено провести дополнительные исследования потерь от релаксации стеклопластиковой арматуры отечественного производства.

Согласно рекомендациям СП 295.1325800.2017, предварительные напряжения арматуры σ_{fp} следует принимать не более $0,45 R_{fn}$ для стеклокомпозитной арматуры. Потери от релаксации напряжений стеклопластиковой арматуры $\Delta\sigma_{fp1}$ принимают равными $0,2\sigma_{fp}$, однако в нормативном документе имеется сноска, что при наличии более точных данных о релаксации арматуры допускается принимать иные значения потерь от релаксации.

Учитывая особенности системы натяжения и работы стержней стеклопластиковой арматуры (АСК) [14, 15], требуется корректировка зависимостей по потерям от релаксации АСК и от проскальзывания в анкерах [16].

Для определения потерь от релаксации и проскальзывания в анкерах проведен эксперимент, когда арматурный стержень диаметром 5,5 мм (стеклопластиковый) фиксировался на испытательной раме с помощью анкеров, натяжение стержню передавалось через фиксирующие анкера, которые перемещали посредством механического вращения упора болтового типа (рис. 2).

Деформации в стержне фиксировались на поверхности при помощи тензодатчиков, значения проскальзывания арматуры в анкерах определяются индикаторами часового типа (рис. 1). Испытания проводились на протяжении 90 сут. Начальные натяжения стержней составляли: 100, 230, 390 и 460 МПа. Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Можно предположить, что разность показаний с индикаторов часового типа и тензодатчика устанавливают релаксацию в стержне. Для проверки данной

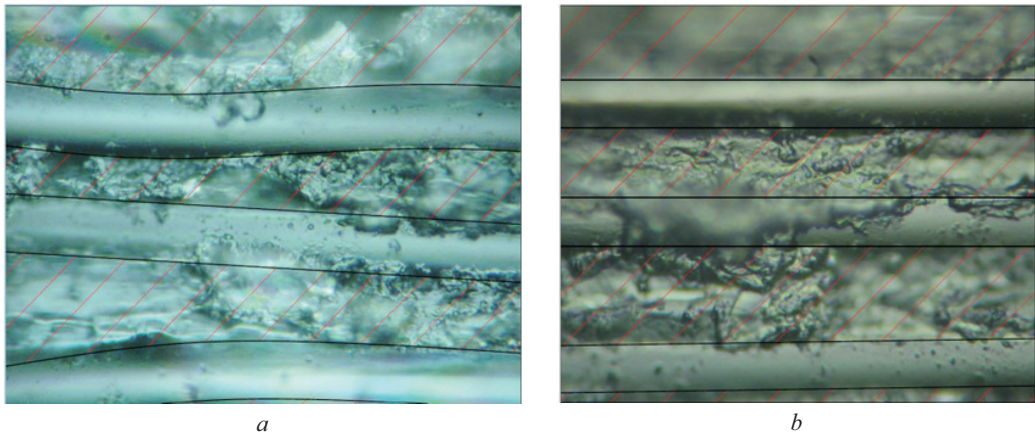


Рис. 5. Продольное расположение волокон в теле стержня при 1000-кратном увеличении: *a* — до восприятия нагрузки; *b* — после восприятия нагрузки

Fig. 5. Longitudinal arrangement of fibres in the stele of the rod at 1,000x magnification: *a* — before the load is perceived; *b* — after the load is perceived

гипотезы дополнительно был подвешен ряд образцов стержней стеклопластиковой арматуры с грузом 200 кг (рис. 3). В итоге подвешенный образец № 1* из табл. 2 показывал аналогичные результаты и даль-

нейшее поведение, что и образец № 2 на испытательной раме.

Согласно графику (рис. 4), наибольшее снижение напряжений фиксировалось в течение первого

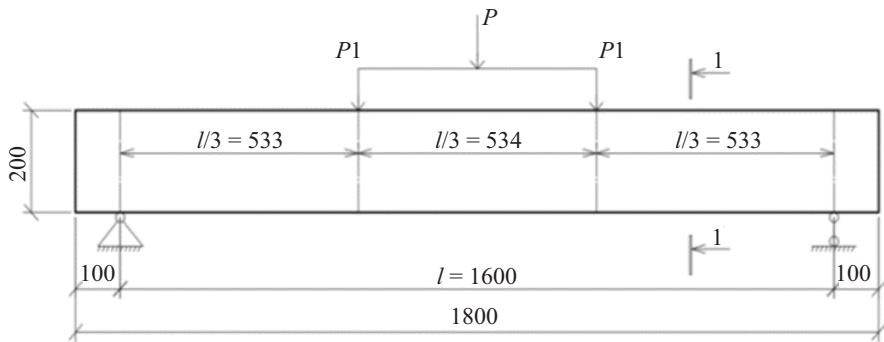


Рис. 6. Схема нагружения балок

Fig. 6. Beam loading scheme



Рис. 7. Тензодатчики на стержнях в защитной оболочке (*a*); фиксация напряжений в арматуре во время набора прочности бетона (*b*)

Fig. 7. Strain gauges on rods in a protective shell (*a*); recording stresses in reinforcement during concrete strength development (*b*)

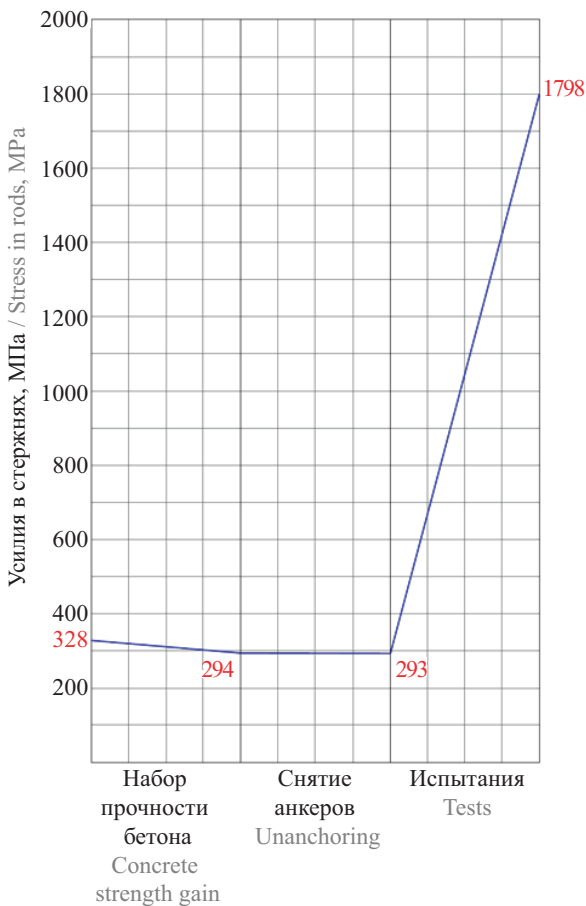


Рис. 8. Усредненный график изменения усилий в арматуре относительно стадии работы балки

Fig. 8. Average graph of changes in forces in reinforcement relative to the stage of operation of the beam

часа наблюдения, переход практически в линейную зависимость наблюдался по истечении 3–4 сут с момента начала испытаний.

Построенные графики на рис. 4 были описаны функциями логарифмической регрессии следующего вида:

$$f(x) = a - b \cdot \ln(x),$$

где $f(x)$ — напряжение в стержне в зависимости от времени; x — время, ч; a — начальное усилие в стержне; параметр b имеет экспоненциальную зависимость от начального напряжения в стержне:

$$b = e^{-2,175+0,0075 \cdot a}.$$

В табл. 2 зафиксированы все функции аппроксимации полученных значений снижения напряжений при эксперименте, коэффициент детерминации не ниже 0,95.

Достигнутая релаксация волокон стеклопластикового стрежня подтверждена изучением структуры волокон до и после нагружения на электронном микроскопе с 1000-кратным увеличением. Из приведенных фотографий на рис. 5 видно, что до восприятия стержнем нагрузки имеются участки, где волокна в теле стержня расположены не параллельно (рис. 5, а), а после приложения и снятия нагрузки заметно выпрямление стеклянных волокон (рис. 5, б). Этот эффект также описан в ACI 440 4R-04:20042, как одна из составляющих потерь напряжений в стержнях от релаксации.

Затем был проведен повторный замер релаксации напряжений в образце № 6 стеклопластикового стрежня с вытянутыми волокнами. При повторном натяжении стержня аналогичной нагрузкой потери от релаксации были практически в 1,5 раза меньше (на 47 %).

Для дальнейшего анализа были изготовлены балки размерами 1800 × 200 × 120 мм (рис. 6, 7) из бетона класса В35, армированные предварительно напряженной опесчаненной АКП Ø5,5 мм, и балки с аналогичным армированием, но без преднапряжения, в которых также фиксировались усилия в арматуре на стадиях натяжения арматуры, набора прочности бетона, распалубки и испытаний.

Натяжение арматуры осуществлялось упорами болтового типа на испытательной раме, фиксация арматуры производилась анкерами собственной разработки.

Начальное натяжение арматуры в балках составляло 328 МПа, которое в процессе набора прочности

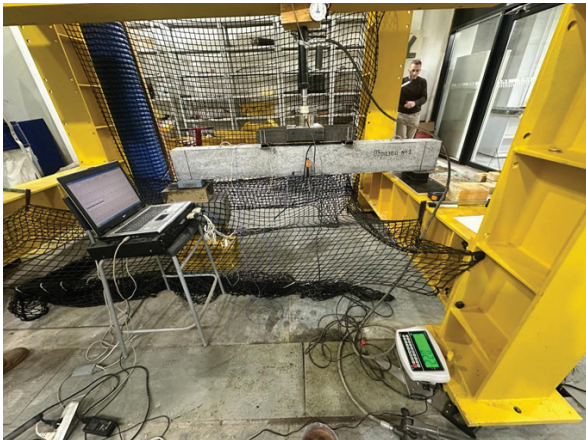


Рис. 9. Нагружение балки

Fig. 9. Beam loading

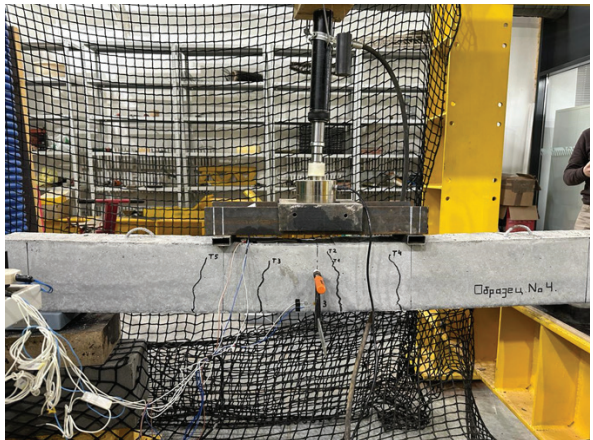


Рис. 10. Образование трещин в балке

Fig. 10. Formation of cracks in a beam

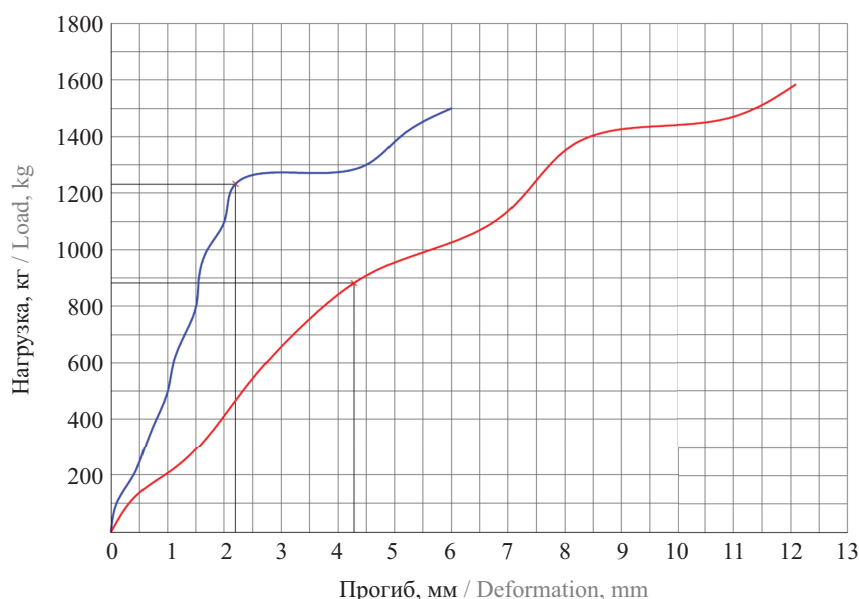


Рис. 11. Усредненный график значений «нагрузка – прогиб» для балок: синий — с предварительным напряжением; красный — без предварительного натяжения

Fig. 11. Average load – deflection graph for beams: blue — prestressing; red — without prestressing

бетона спало до 294 МПа (рис. 8). Испытания балок производились по ГОСТ 10180–2012 (рис. 9, 10). Образцы одним концом опирались на шарнирно-неподвижную опору, другим концом — на шарнирно-подвижную опору.

В период проведения испытаний одновременно измерялись параметры: P (нагрузка, кН); f (прогиб, мм); Δl (ширина раскрытия трещин, мм). Результаты испытаний представлены в виде графических зависимостей по средним значениям, полученным при испытании пяти образцов (рис. 11).

Из графиков видно, что момент трещинообразования у балок с предварительным напряжением АСК зафиксирован при нагрузке 12,01 кН, а у балок без предварительного напряжения при нагрузке 8,89 кН, что показывает повышение трещиностойкости на 35 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование потерь напряжений в стеклопластиковой арматуре при релаксации и ползучести показало, что потери напряжений наиболее выражены в первые дни после натяжения арматуры, с последующим снижением скорости потерь со временем.

Релаксационные потери в стеклопластиковой арматуре были количественно определены на осно-

вании проведенных экспериментов, которые подтвердили, что логарифмическая зависимость хорошо описывает характер потерь напряжений в материале.

Научная новизна исследования заключается в получении экспериментальных данных по релаксации арматуры из стеклопластика отечественного производства, что дополняет существующие знания и позволяет уточнить нормативные документы, такие как СП 295.1325800.2017.

Практическая значимость работы в том, что полученные результаты дают возможность прогнозировать долговечность и эксплуатационные характеристики конструкций с применением стеклопластиковой арматуры, а также вносить коррективы в существующие инженерные решения для минимизации потерь напряжений.

Рекомендации для практики включают необходимость дальнейших исследований для уточнения коэффициентов релаксации в зависимости от начального напряжения, а также разработки более точных методов расчета для инженерных приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирсаяпов И.Т., Лим В.А., Мирсаяпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65).

С. 145–153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145. EDN KGTNOV.

2. Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной по-

лимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 12. С. 1663–1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672. EDN XABHJC.

3. Мирсаяпов И.Т., Минзянов Р.И., Зайнутдинов А.М. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 122–134. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_122. EDN JKTSTG.

4. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Мандрик-Котов Б.Б., Михалдыкин Е.С. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве // Интернет-журнал Научное ведение. 2016. Т. 8. № 6 (37). С. 89. EDN XXYGYT.

5. Антаков И.А., Сулейманов А.М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 101–109. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101. EDN HJVCIL.

6. Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б. К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 413–428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428. EDN OSLXAT.

7. Белуцкий И.Ю., Сим А.Д. Обоснование необходимости предварительного напряжения низко модульной неметаллической арматуры при использовании в изгибаемых бетонных элементах // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : междунар. сб. науч. тр. 2015. Т. 15. С. 105–112. EDN VMUFVF.

8. Кулиш В.И., Казаринов В.Е. Несущие конструкции, напряженно армированные стеклопластиковой арматурой. Хабаровск : НТО Стройиндустрии, 1989. 107 с.

9. Oskouei A.V., Taleie S.M. Experimental Investigation of Relaxation of Fiber-reinforced Polymer Composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2010. Vol. 29. Issue 17. Pp. 2705–2718. DOI: 10.1177/0731684409357256

Поступила в редакцию 16 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Булат Шавкатович Умаров — инженер-технолог; Татавтодор; 420012, г. Казань, ул. Достоевского, д. 18/75; ORCID: 0000-0001-8802-0871; bulat.umar@gmail.com;

Тагир Альмирович Зиннуров — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-7238-2883; leongar@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

10. Сулейманов А.М., Туйсина Е.Б. Экспериментальное определение значимости воздействия эксплуатационных факторов на полимерную матрицу пултрузионных стеклопластиковых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 98–109. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-98-109. EDN BNLBOU.

11. Ryngier K., Zdanowicz L. Prestressing concrete structures with CFRP composite tendons // Engineering Transactions. 2015. Vol. 63. Issue 4. Pp. 407–420. DOI: 10.24423/engtrans.261.2015

12. Li G.W., Pei H.F., Hong C.Y. Study on the Stress Relaxation Behavior of Large Diameter B-GFRP Bars Using FBG Sensing Technology // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2013. Vol. 9. Issue 10. P. 201767. DOI: 10.1155/2013/201767

13. Fornusek J., Konvalinka P., Sovjak R., Vitek J.L. Creep and stress relaxation of pre-stressed GFRP tendons in concrete structures // 9th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures. 2009.

14. Пискунов А.А., Зиннуров Т.А., Бережной Д.В., Умаров Б.Ш., Вольтер А.Р. О результатах экспериментального и численного исследований напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 2. С. 2. DOI: 10.15862/02SATS218. EDN XTGBLF.

15. Зиннуров Т.А., Пискунов А.А., Петропавловских О.К., Яруллин Р.Р., Умаров Б.Ш., Вольтер А.Р. Метод изготовления предварительно напряженных конструкций с композитным армированием и композитным фибробетоном // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4. № 2. С. 5. DOI: 10.15862/05TS217. EDN ZEKYSD.

16. Патент RU № 176504 U1. Анкерное устройство для фиксации предварительно-напряженных арматурных стержней / Умаров Б.Ш., Пискунов А.А., Зиннуров Т.А., Сафиюлина Л.Г., Петропавловских О.К., Вольтер А.Р.; заявл. № 2016126915 от 2016.07.04; опубл. 2018.01.22.

REFERENCES

1. Mirsayapov I.T., Lim V.A., Mirsayapov A.I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):145-153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145. EDN KGTHOV. (rus.).
2. Mirsayapov I.T., Antakov I.A., Antakov A.B. The analysis of crack width in flexural concrete members reinforced with polymer composite bars. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(12):1663-1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672. EDN XABHJC. (rus.).
3. Mirsayapov I.T., Minzyanov R.I., Zainutdinov A.M. Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):122-134. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_122. EDN JKTSTG. (rus.).
4. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Mandrik-Kotov B.B., Mikhaldykin E.S. Problems of application of polymeric composite materials in transport construction. *Naukovedenie*. 2016; 8(6):37:89. EDN XXYGYT. (rus.).
5. Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):101-109. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101. EDN HJVCIL. (rus.).
6. Mirsayapov I.T., Antakov I.A., Antakov A.B. To the design of the deflections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(4):413-428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428. EDN OSLXAT. (rus.).
7. Belutskiy I.Yu., Sim A.D. Specificity of designing and manufacturing of structures reinforced with low-modulus composite reinforcement. *Far East. Highways and Traffic Safety: international collection of scientific papers*. 2015; 15:105-112. EDN VMUFVF. (rus.).
8. Kulish V.I., Kazarinov V.E. *Load-bearing structures, stressedly reinforced with fiberglass reinforcement*. Khabarovsk, NTO Construction Industry, 1989; 108. (rus.).
9. Oskouei A.V., Taleie S.M. Experimental Investigation of Relaxation of Fiber-reinforced Polymer Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010; 29(17):2705-2718. DOI: 10.1177/07316844-09357256
10. Suleimanov A.M., Tuisina E.B. Experimental determination of the significance of the impact of operational factors on the polymer matrix of pultrusion fiberglass profiles. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):98-109. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-98-109. EDN BN-LBOU. (rus.).
11. Ryngier K., Zdanowicz Ł. Prestressing concrete structures with CFRP composite tendons. *Engineering Transactions*. 2015; 63(4):407-420. DOI: 10.24423/eng-trans.261.2015
12. Li G.W., Pei H.F., Hong C.Y. Study on the Stress Relaxation Behavior of Large Diameter B-GFRP Bars Using FBG Sensing Technology. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013; 9(10):201767. DOI: 10.1155/2013/201767
13. Fornusek J., Konvalinka P., Sovjak R., Vittek J.L. Creep and stress relaxation of pre-stressed GFRP tendons in concrete structures. *9th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. 2009.
14. Piskunov A.A., Zinnurov T.A., Bereznoi D.V., Umarov B.Sh., Volter A.R. Experimental and numerical studies of stress-strain state of concrete structures reinforced with polymer-composite reinforcement. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018; 5(2):2. DOI: 10.15862/02SATS218. EDN XTGBLF. (rus.).
15. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Petropavlovskikh O.K., Yarullin R.R., Umarov B.Sh., Volter A.R. Method for manufacturing prestressed structures with composite reinforcement and composite fiber-reinforced concrete. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017; 4(2):5. DOI: 10.15862/05TS217. EDN ZEKYSD. (rus.).
16. Patent RU No. 176504 U1. *Anchor device for fixing prestressed reinforcement bars* / Umarov B.Sh., Piskunov A.A., Zinnurov T.A., Safiulina L.G., Petropavlovskikh O.K., Volter A.R.; declared No. 2016126915 2016.07.04; publ. 2018.01.22.

Received June 16, 2024.

Adopted in revised form on September 10, 2024.

Approved for publication on October 28, 2024.

BIONOTES: **Bulat Sh. Umarov** — engineer-technologist; **Tatavtodor**; 18/75 Dostoevsky st., Kazan, 420012, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8802-0871; bulat.umar@gmail.com;

Tagir A. Zinnurov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, senior researcher; **Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7238-2883; leongar@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Формирование расчетных схем групповых прицельных связей для некоторых упругих систем

Ирек Энварович Файзуллин¹, Леонид Семенович Ляхович²,
Павел Алексеевич Акимов³, Заур Рашидович Галаяутдинов²,
Андрей Сергеевич Пляскин²

¹ Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства
Российской Федерации (Минстрой России); г. Москва, Россия;

² Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ); г. Томск, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для некоторых упругих систем с конечным числом степеней свободы масс, у которых направления движения масс параллельны, разработаны методы создания дополнительных связей, введение каждой из которых прицельно увеличивает величину только одной собственной частоты до заданного значения, не изменяет при этом ни одну из остальных собственных частот и ни одну из форм собственных колебаний. Если необходимо прицельно увеличить величины нескольких собственных частот, то это требование можно реализовать созданием соответствующего количества отдельных прицельных связей. Расчетная схема каждой из отдельных прицельных связей должна включать стойки, установленные в узлах приложения масс и направленные по траектории их движения. В некоторых случаях отдельные прицельные связи могут автономно устанавливаться на исходной системе. В большинстве случаев на основе отдельных прицельных связей формируется расчетная схема единой групповой прицельной связи, которая увеличивает все намеченные частоты до заданных значений, не изменяя при этом ни одну из остальных собственных частот и ни одну из форм собственных колебаний.

Материалы и методы. Использовались методы прицельного регулирования спектра частот собственных колебаний упругих систем, основанные на введении дополнительных связей, предложенные и развитые в работах Л.С. Ляховича. В верификационных целях также применяется метод конечных элементов и соответствующее реализующее программное обеспечение.

Результаты. Предложен способ формирования матрицы дополнительных жесткостей, которой соответствует групповая прицельная связь. Сформулированы требования к отдельным прицельным связям, на основе которых формируется групповая прицельная связь. Предложен алгоритм формирования групповых прицельных связей с учетом сформулированных требований. Рассматривается верификация алгоритма формирования групповых прицельных связей с учетом сформулированных требований на базе решения тестовых задач с использованием программных продуктов SCAD и ЛИРА.

Выводы. Результаты работы могут применяться научно-исследовательскими и проектными организациями, а также в образовательных организациях высшего образования при подготовке спецкурсов для строительных специальностей (направлений подготовки).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: частота собственных колебаний, форма собственных колебаний, отдельная прицельная связь, групповая прицельная связь, коэффициенты дополнительных жесткостей, прицельное регулирование спектра частот, строительные конструкции, упругие системы

Благодарности. Авторы благодарят доктора технических наук, профессора, академика РААСН Владимира Ильича Травуша за обсуждение материала статьи, советы и рекомендации.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Файзуллин И.Э., Ляхович Л.С., Акимов П.А., Галаяутдинов З.Р., Пляскин А.С. Формирование расчетных схем групповых прицельных связей для некоторых упругих систем // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 60–72. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.60-72

Автор, ответственный за переписку: Павел Алексеевич Акимов, AkimovPA@mgsu.ru.

Development of computational schemes of group targeted connections for some elastic systems

Irek E. Faizullin¹, Leonid S. Lyakhovich², Pavel A. Akimov³, Zaur R. Galautdinov²,
Andrey S. Plyaskin²

¹ Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation;
Moscow, Russian Federation;

² Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB); Tomsk, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. For some elastic systems with a finite number of degrees of freedom of masses, in which the directions of mass movement are parallel, methods of creating additional connections were developed, the introduction of each of which purposefully increases the value of only one natural frequency to a given value, while not changing any of the other natural frequencies and not one of the natural modes (forms of natural oscillations). If it is necessary to increase the values of several natural frequencies in a targeted manner, then this requirement can be implemented by creating an appropriate number of separate targeted connections. The computational scheme of each of the individual targeted connections should include racks installed at the nodes of mass application and directed along the trajectory of their movement. In some cases, individual targeted connections can be independently installed on the original (initial) system. In most cases, on the basis of individual targeted connections, a computational scheme of a united group targeted connection is developed, which increases all the intended frequencies to the set values, without changing any of the other natural frequencies and not one of the natural modes. Calculation examples are presented.

Materials and methods. Methods of targeted control of the frequency spectrum of natural oscillations of elastic systems are used in the paper. These methods, which are based on the introduction of additional connections, were proposed and developed in the works of L.S. Lyakhovich. For verification purposes, the finite element method (FEM) and the corresponding software are also used.

Results. A method of forming a matrix of additional stiffness, which corresponds to a group targeted connection is proposed. The requirements for those targeted connections, on the basis of which a group targeted connection is formed, are formulated. An algorithm for the development of a group targeted connection is proposed with allowance for the formulated requirements. Verification of the proposed algorithm for the development of a group targeted connection is done with the use of SCAD and Lira Software products.

Conclusions. The results of the work can be used by research and design organizations, as well as in higher education institutions in the preparation of special courses for construction specialties (areas of training).

KEYWORDS: natural frequency, natural mode, targeted connection, group targeted connection, additional stiffness coefficients, targeted frequency spectrum control, building systems, elastic systems

Acknowledgements. The authors thank Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS) Vladimir Ilyich Travush for discussion of the paper material, advice and recommendations.

FOR CITATION: Faizullin I.E., Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Galautdinov Z.R., Plyaskin A.S. Development of computational schemes of group targeted connections for some elastic systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):60-72. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.60-72 (rus.).

Corresponding author: Pavel A. Akimov, AkimovPA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–12] для упругих систем с конечным числом степеней свободы масс, у которых направления движения масс параллельны, были сформулированы теоретические подходы и предложены методы формирования расчетных схем прицельных связей. Каждая из них увеличивает значение только одной частоты собственных колебаний до заданной величины, не изменяя при этом ни одну из остальных собственных частот и ни одну из форм собственных колебаний.

Если условия эксплуатации требуют освободить определенный интервал спектра частот собственных колебаний от нескольких из них, то это требование может быть реализовано созданием соответствующего количества отдельных прицельных связей. В каждую из таких отдельных прицельных связей включены основные стойки, установленные в узлах приложения масс и направленные по траектории их движения. В некоторых случаях отдельные прицельные связи могут автономно размещаться на исходной системе.

В данной статье, которая является продолжением исследований [4, 5, 10–12], рассмотрен способ формирования на базе отдельных прицельных свя-

зей расчетной схемы единой групповой прицельной связи, которая увеличивает все намеченные частоты до заданных значений, не изменяя при этом ни одну из остальных собственных частот и ни одну из форм собственных колебаний.

В целом статья направлена на решение актуальных задач строительной отрасли, в том числе в части импортозамещения, повышения производительности труда на основе выполнения прикладных разработок и развития фундаментальных научных исследований, на повышение кадрового потенциала, формирование компетенций по проведению научных исследований национального и мирового уровня, в частности, в рамках Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Так как формирование групповой прицельной связи основано на синтезе отдельных прицельных связей, то требуется обеспечить адекватность параметров каждой отдельной прицельной связи с ее составляющей в составе групповой.

Стержни поясов отдельных прицельных связей сохраняют в групповой связи независимость и свои

параметры. Ключевые стойки, установленные в узлах приложения масс и направленные по траектории их движения, совмещаются. Чтобы параметры основных стоек отдельных прицельных связей были адекватны их параметрам в групповой связи, необходимо при формировании отдельных прицельных связей проектировать жесткости сечений стержней стоек этих связей так, чтобы они зависели бы только от номера стойки и не зависели от номеров отдельных прицельных связей. Пусть $E[i, k]$ $F_{st}[i, k]$ жесткость сечения i -й стойки в k -й прицельной связи. Таким образом, $E[i, k]$ $F_{st}[i, k]$ должны зависеть только от i и не зависеть от k .

Алгоритм действий по формированию расчетной схемы групповой прицельной связи:

1. Формируются отдельные прицельные связи, каждая из которых увеличивает одну из намеченных собственных частот до заданного значения. При этом выполняются все действия [1–12], при которых значения длин всех основных стоек будут одного знака. Также жесткости сечений $E[i, k]$ $F_{st}[i, k]$ должны зависеть только от i и не зависеть от k .

2. Все отдельные прицельные связи размещаются в узлах пластины.

3. На участках, где совместились несколько стоек, оставляется только одна.

4. В местах пересечения стержней вводятся шарниры.

При реализации первого действия алгоритма рассматривается спектр частот собственных колебаний исходной системы с n степенями свободы $\omega[1]$, $\omega[2]$, ..., $\omega[q]$, ..., $\omega[q+j]$, $\omega[q+(j+1)]$, ..., $\omega[n]$, в котором требуется прицельно освободить частотный интервал $\omega[q]$, ..., $\omega[q+j]$ от j частот, увеличив их величины соответственно до значений $\omega[s]$, ..., $\omega[s+j]$, каждое из которых больше чем $\omega[q+j]$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Покажем реализацию действий алгоритма на примерах из работ [1–12].

На рис. 1, а приведена исходная система. Пластина [13–15] шарнирно оперта по контуру. Толщина пластины 0,12 м. Модуль упругости материала пластины $E = 2,4 \cdot 10^{10}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0,2$. Масса пластины предельно мала (0,00000001 кг/м³). В узлах пластины расположены массы:

$m[1] = 1000$ кг, $m[2] = 1100$ кг, $m[3] = 1150$ кг, $m[4] = 1200$ кг.

На рис. 1, б показана основная система метода перемещений [1, 3, 6–9].

Коэффициенты уравнений метода перемещений и значения узловых масс образуют матрицы:

$A = \|r[i, k]\|$; $M = \|m[i]\|$. (1)

Величины коэффициентов уравнений метода перемещений приведены в табл. 1.

Корни уравнения:

$|A - \omega^2 M| = 0$. (2)

определяют спектр частот собственных колебаний системы. Частоты и формы собственных колебаний пластины представлены в табл. 2.

Требуется увеличить введением прицельных связей третью собственную частоту до 220 с⁻¹, а четвертую до 230 с⁻¹.

Для дальнейшей реализации первого действия алгоритма для рассматриваемого примера необходимо сформировать две отдельные прицельные связи, одна из которых увеличит третью частоту собственных колебаний до 220 с⁻¹, а другая четвертую до 230 с⁻¹.

В исследованиях [1–12] показано, что создание прицельной обобщенной связи основано на форми-

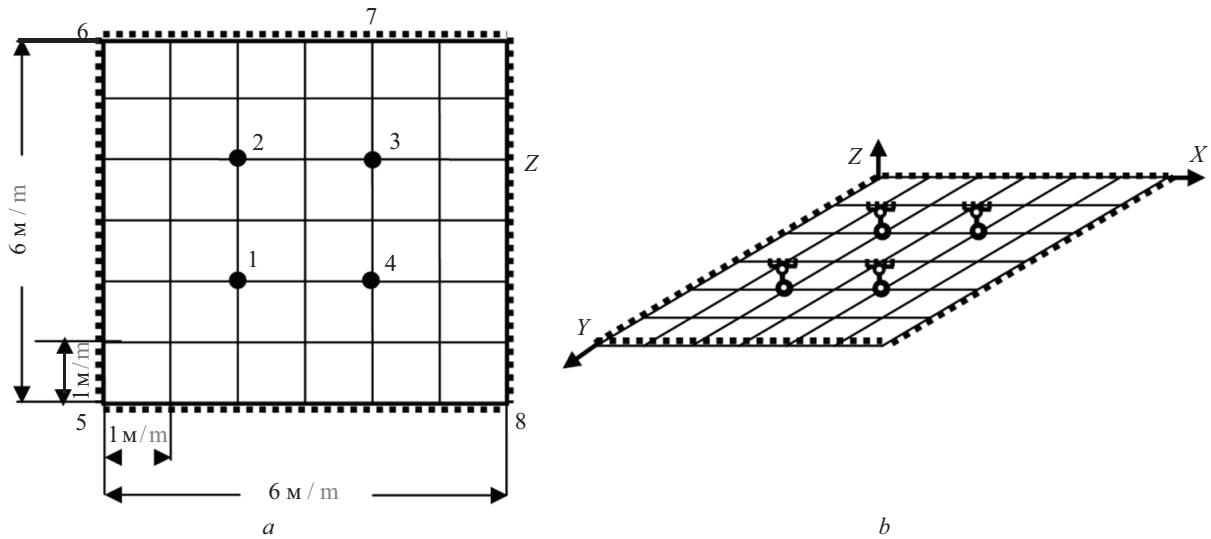


Рис. 1. Рассматриваемая система (пример расчета)
Fig. 1. The system under consideration (calculation example)

Табл. 1. Величины коэффициентов метода перемещений (пример расчета)

Table 1. The values of displacement method coefficients (calculation example)

i, k	1	2	3	4
1	22 758 257,28	–9 604 812,96	585 308,28	–9 604 812,96
2	–9 604 812,96	22 758 257,28	–9 604 812,96	585 308,28
3	585 308,28	–9 604 812,96	22 758 257,28	–9 604 812,96
4	–9 604 812,96	585 308,28	–9 604 812,96	22 758 257,28

Табл. 2. Собственные частоты формы колебаний пластины (пример расчета)

Table 2. The values of displacement method coefficients (calculation example)

ω	60,932	138,865	143,624	196,414
1	0,4905	0,0001	0,7047	–0,5934
2	0,4966	–0,7075	0,0945	0,5167
3	0,5058	–0,0711	–0,7029	–0,4387
4	0,5069	0,7032	0,0190	0,4341

Табл. 3. Значения коэффициентов матрицы дополнительной жесткости, увеличивающей третью частоту собственных колебаний до 220 с^{–1} (пример расчета)

Table 3. The values of the coefficients of the additional stiffness matrix, increasing the third natural frequency to 220 s^{–1} (calculation example)

i, k	1	2	3	4
1	12 829 437,77	1 892 709,01	–14 715 733,27	414 235,72
2	1 892 709,01	279 228,71	–2 170 991,55	61 111,62
3	–14 715 733,27	–2 170 991,55	16 879 368,34	–475 140,26
4	414 235,72	61 111,62	–475 140,26	13 374,81

Табл. 4. Собственные частоты формы колебаний пластины (пример расчета)

Table 4. The natural frequencies and natural modes of the plate (sample of analysis)

ω	60,932	138,865	196,414	220
1	0,4905	0,0001	–0,5934	0,7047
2	0,4966	–0,7075	0,5167	0,0945
3	0,5058	–0,0711	–0,4387	–0,7029
4	0,5069	0,7032	0,4341	0,0190

Табл. 5. Значения коэффициентов матрицы дополнительной жесткости, увеличивающей четвертую частоту собственных колебаний до 230 с^{–1} (пример расчета)

Table 5. The values of the coefficients of the additional stiffness matrix, increasing the third natural frequency to 230 s^{–1} (calculation example)

i, k	1	2	3	4
1	4 613 401,93	–4 418 412,37	3 922 001,78	–4 049 185,23
2	–4 418 412,37	4 231 664,23	–3 756 234,88	3 878 042,80
3	3 922 001,78	–3 756 234,88	3 334 220,22	–3 442 342,97
4	–4 049 185,23	3 878 042,80	–3 442 342,97	3 553 971,95

ровании матрицы коэффициентов дополнительной жесткости:

$$A_0 = \|a_0[i, k]\|_{i,k=1}^n, \tag{3}$$

и приведен порядок их определения.

Значения коэффициентов матрицы дополнительной жесткости, увеличивающей третью частоту собственных колебаний до 220 с^{–1}, приведены в табл. 3.

Корни уравнения:

$$|(A + A_0) - \omega^2 M| = 0 \tag{4}$$

определяют спектр частот и форм собственных колебаний системы, усиленной прицельной связью, повышающей третью частоту собственных колебаний до 220 с^{–1}.

Частоты и координаты форм собственных колебаний представлены в табл. 4.

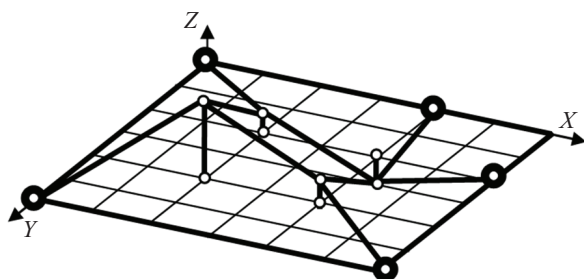


Рис. 2. Общий вид прицельной связи (пример расчета)

Fig. 2. The general appearance of targeted connection (calculation example)

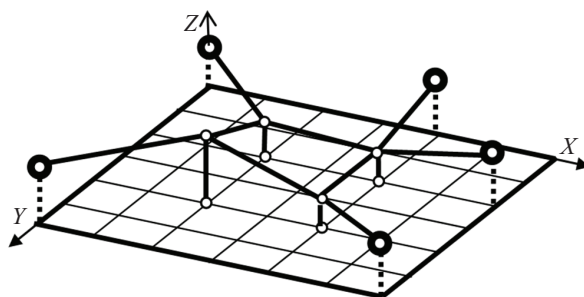


Рис. 3. Общий вид модифицированной прицельной связи (пример расчета)

Fig. 3. The general appearance of modified targeted connection (calculation example)

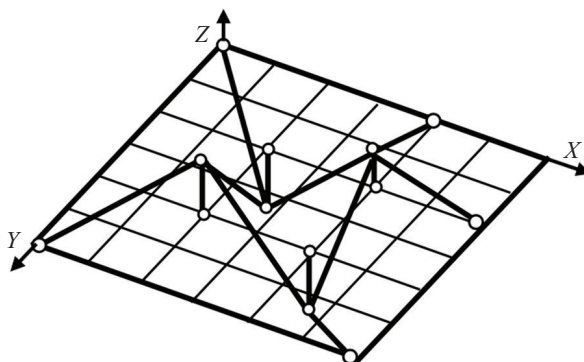


Рис. 4. Общий вид прицельной связи (пример расчета)

Fig. 4. The general appearance of modified targeted connection (calculation example)

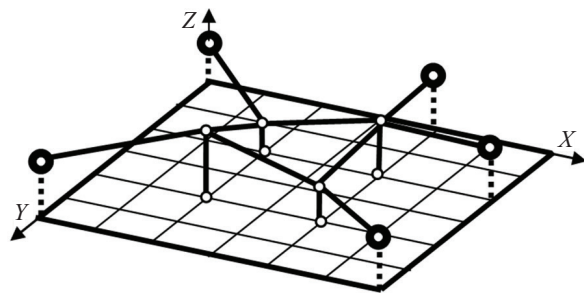


Рис. 5. Общий вид модифицированной прицельной связи (пример расчета)

Fig. 5. The general appearance of modified targeted connection (calculation example)

При формировании расчетной схемы этой прицельной связи длина первой стойки была принята $l_{st}[1] = 0,4$ м, а площадь сечения стержней стоек $F_{st} = 0,004$ м², диаметр $D_{st} = 0,07136496$ м. Площади сечения стержней пояса приняты одинаковыми, а величина их определялась в процессе формирования связи [1–12]. Сечения стержней пояса $F_p = 0,00684$ м², $D_p = 0,0933$ м.

Длины стоек связи равны:

$$l_{st}[1] = 0,4 \text{ м}, l_{st}[2] = 0,09782 \text{ м}, \\ l_{st}[3] = -0,26064 \text{ м}, l_{st}[4] = 0,05770 \text{ м}.$$

Модуль упругости материала стержней связи $E_{sp} = 2,06 \cdot 10^{11}$ Н/м². Длины стоек оказались разных знаков. Поэтому стержни поясов, соединяющих вершины стоек 2–3 и 3–4, должны проходить «сквозь» пластину. Конструктивно такая схема требует идеально свободного «прохождения» части стержней прицельной связи «сквозь» исходную систему, что почти нереализуемо. Общий вид этой прицельной связи показан на рис. 2.

В этих случаях прицельную связь следует сдвинуть по направлению движения масс в положительном или отрицательном направлении на величину, при которой значения всех длин основных стоек будут одного знака.

При выборе величин сдвига необходимо учитывать условия эксплуатации и конструктивные требования при формировании групповой прицельной связи.

В данном примере принята величина сдвига связи на 0,3 м. Соответственно длина первой стойки теперь станет 0,7 м, а площади сечений стоек оставлены $F_{st} = 0,004$ м².

После сдвига длины стоек изменились:

$$l_{st}[1] = 0,7 \text{ м}, l_{st}[2] = 0,39782 \text{ м}, \\ l_{st}[3] = 0,03945 \text{ м}, l_{st}[4] = 0,35770 \text{ м}.$$

Общий вид этой измененной прицельной связи показан на рис. 3.

Отдельная прицельная связь, повышающая четвертую частоту собственных колебаний до 230 с⁻¹, формируется аналогично предыдущей связи. Значения коэффициентов матрицы дополнительной жесткости представлены в табл. 5.

Длина первой стойки задана 0,4 м, а площади сечений стоек приняты $F_{st} = 0,004$ м², т.е. такими же, как и при формировании предыдущей прицельной связи. Площади сечения стержней пояса приняты одинаковыми, величина их определялась в процессе формирования связи [1–12]. Частоты и координаты форм собственных колебаний приведены в табл. 6.

Сечения стержней пояса $F_p = 0,000697$ м², $D_p = 0,02988$ м. Длины стоек этой связи равны:

$$l_{st}[1] = 0,4 \text{ м}, l_{st}[2] = -0,43643 \text{ м}, \\ l_{st}[3] = 0,22436 \text{ м}, l_{st}[4] = -0,38251 \text{ м}.$$

Длины стоек и здесь оказались разных знаков. Общий вид этой прицельной связи показан на рис. 4.

Поэтому прицельную связь следует сдвинуть по направлению движения масс в положительном или отрицательном направлении на величину, при ко-

Табл. 6. Собственные частоты формы колебаний пластины (пример расчета)

Table 6. The values of coefficients of the group matrix of additional stiffness (calculation example)

ω	60,932	138,865	143,624	230
1	0,4905	0,0001	0,7047	-0,5934
2	0,4966	-0,7075	0,0945	0,5167
3	0,5058	-0,0711	-0,7029	-0,4387
4	0,5069	0,7032	0,0190	0,4341

Табл. 7. Значения коэффициентов групповой матрицы дополнительной жесткости (пример расчета)

Table 7. The plan view of the group targeted connection and the numbering of the nodes (calculation example)

i, k	1	2	3	4
1	4 613 401,93	-4 418 412,37	3 922 001,78	-4 049 185,23
2	-4 418 412,37	4 231 664,23	-3 756 234,88	3 878 042,80
3	3 922 001,78	-3 756 234,88	3 334 220,22	-3 442 342,97
4	-4 049 185,23	3 878 042,80	-3 442 342,97	3 553 971,95

торой значения всех длин основных стоек будут одного знака. Общий вид этой измененной прицельной связи показан на рис. 5.

Предположим, что конструктивные ограничения требуют, чтобы в расчетной схеме групповой прицельной связи стержни поясов не пересекались. Поэтому в рассматриваемом случае принята величина сдвига связи на 0,85 м. Теперь:

$$l_{st}[1] = 1,25 \text{ м}, l_{st}[2] = 0,4136 \text{ м}, \\ l_{st}[3] = 1,0744 \text{ м}, l_{st}[4] = 0,4674 \text{ м}.$$

Общий вид этой прицельной связи показан на рис. 5.

После формирования всех отдельных прицельных связей, необходимых для решения поставленной

задачи, можно образовать групповую матрицу коэффициентов дополнительной жесткости. Для этого достаточно суммировать коэффициенты матриц дополнительных жесткостей отдельных прицельных связей.

В рассматриваемом примере суммируются соответствующие коэффициенты табл. 3 и 5. Коэффициенты групповой матрицы дополнительной жесткости приведены в табл. 7.

Если обозначить групповую матрицу дополнительной жесткости $\bar{A}_0$, то корни уравнения:

$$|(A + \bar{A}_0) - \omega^2 M| = 0 \tag{5}$$

определят спектр частот и форм собственных колебаний системы, усиленной групповой прицельной

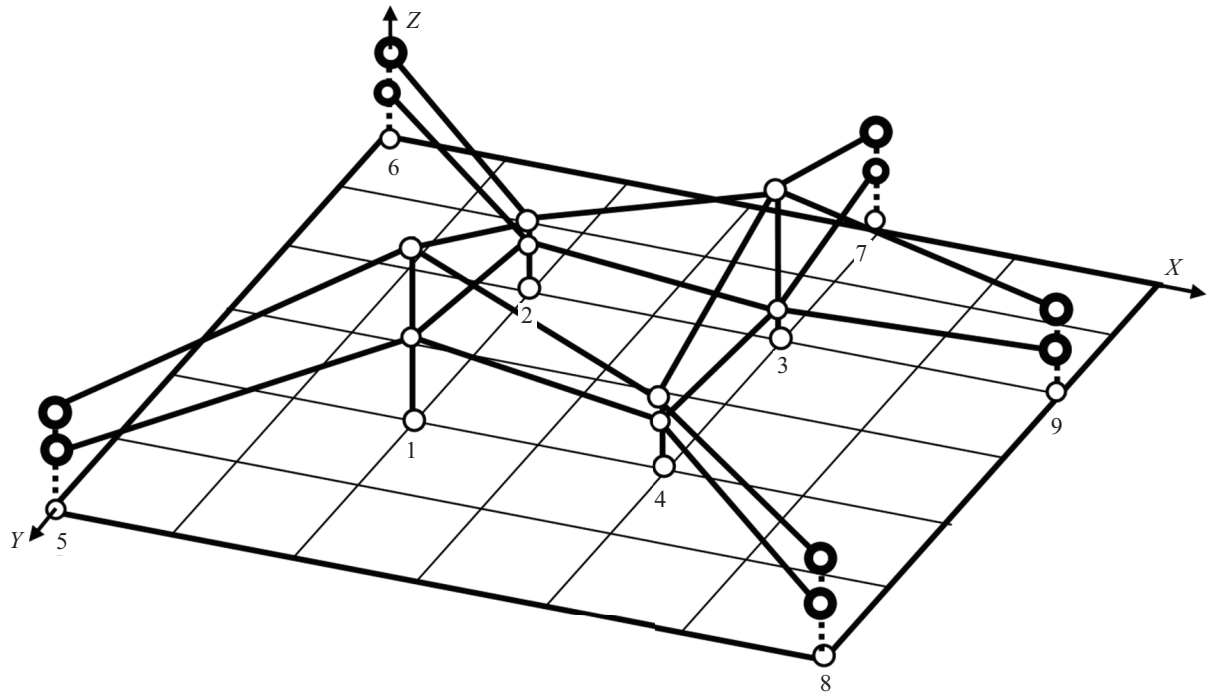


Рис. 6. Общий вид групповой прицельной связи (пример расчета)

Fig. 6. The plan view of the group targeted connection and the numbering of the nodes (calculation example)

Табл. 8. Собственные частоты формы колебаний пластины (пример расчета)

Table 8. The natural frequencies of the plate vibration waveform (calculation example)

ω	60,932	138,865	220	230
1	0,4905	0,0001	0,7047	-0,5934
2	0,4966	-0,7075	0,0945	0,5167
3	0,5058	-0,0711	-0,7029	-0,4387
4	0,5069	0,7032	0,0190	0,4341

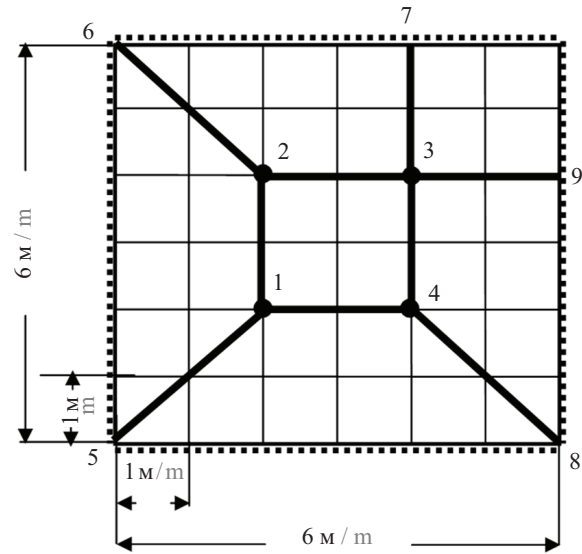


Рис. 7. Вид в плане групповой прицельной связи и нумерация узлов (пример расчета)

Fig. 7. The plan view of the group targeted connection and the numbering of the nodes (calculation example)

связью, повышающей третью частоту собственных колебаний до 220 с⁻¹, а четвертую до 230 с⁻¹. Частоты и координаты форм собственных колебаний представлены в табл. 8.

Реализуя действия 2, 3 и 4 приведенного выше алгоритма, образуем групповую прицельную связь. Общий вид этой связи показан на рис. 6. Вид этой связи в плане и нумерация узлов приведены на рис. 7. Координаты z узлов групповой прицельной связи представлены в табл. 9.

При реализации второго действия алгоритма формирования групповой прицельной связи отдельные прицельные связи размещаются в узлах пластины. При этом на нижних участках связи стойки совмещаются и из них на каждом из этих участках оставляется только одна.

При формировании отдельных прицельных связей жесткости сечений стержней стоек задавались так, чтобы в каждом узле они бы совпадали между собой. Именно это обстоятельство обеспечивает адекватность параметров основных стоек отдельных прицельных связей их параметрам в групповой связи.

Табл. 9. Координаты z узлов групповой прицельной связи (пример)

Table 9. The z coordinates of the nodes of the group targeted connection

Номер узла Number of node	Координаты z Coordinates z	
	Верх Top	Низ Bottom
1	1,25	0,7
2	0,4136	0,3978
3	1,0744	0,03944
4	0,4764	0,3577
5	0,85	0,3
6	0,85	0,3
7	0,85	0,3
8	0,85	0,3
9	0,85	0,3

Проведем тестирование этой групповой прицельной связи на программных продуктах SCAD и ЛИРА [16–25]. Вначале определим частоты и координаты форм собственных колебаний исходной пластины. Результаты теста, представленные в табл. 10, достаточно близки (отличия около одного процента) результатам, приведенным в табл. 2, что подтверждает достоверность исходных данных.

Частоты и координаты форм собственных колебаний, представленные в табл. 8, получены как корни уравнения (5) на основе использования групповой матрицы коэффициентов дополнительной жесткости $\bar{A}_0$ до формирования расчетной схемы групповой прицельной связи.

Частоты и координаты форм собственных колебаний, расчетной схемы групповой прицельной связи, полученные по тесту, представлены в табл. 11. Эти результаты получены тестированием расчетной схемы группой прицельной связи.

Сравнение результатов, приведенных в табл. 10, 11, показывает, что изменились только те частоты, на которые была нацелена групповая связь, а координаты форм собственных колебаний и остальные

Табл. 10. Собственные частоты формы колебаний пластины (пример расчета)

Table 10. The natural frequencies of the plate vibration waveform (calculation example)

ω	60,341	137,618	142,334	194,681
1	0,4903	0,0012	0,7213	−0,5747
2	0,4968	−0,7042	0,0805	0,5212
3	0,5056	0,0721	−0,6879	−0,4586
4	0,5071	0,7063	0,0072	0,4333

Табл. 11. Собственные частоты формы колебаний расчетной схемы групповой прицельной связи (пример расчета)

Table 11. The natural frequencies of the vibration waveform of the design scheme of the group targeted connection (calculation example)

ω	60,341	137,618	219,151	227,946
1	0,4903	0,0012	0,7213	−0,5747
2	0,4968	−0,7042	0,0805	0,5212
3	0,5056	0,0721	−0,6879	−0,4586
4	0,5071	0,7063	0,0072	0,4333

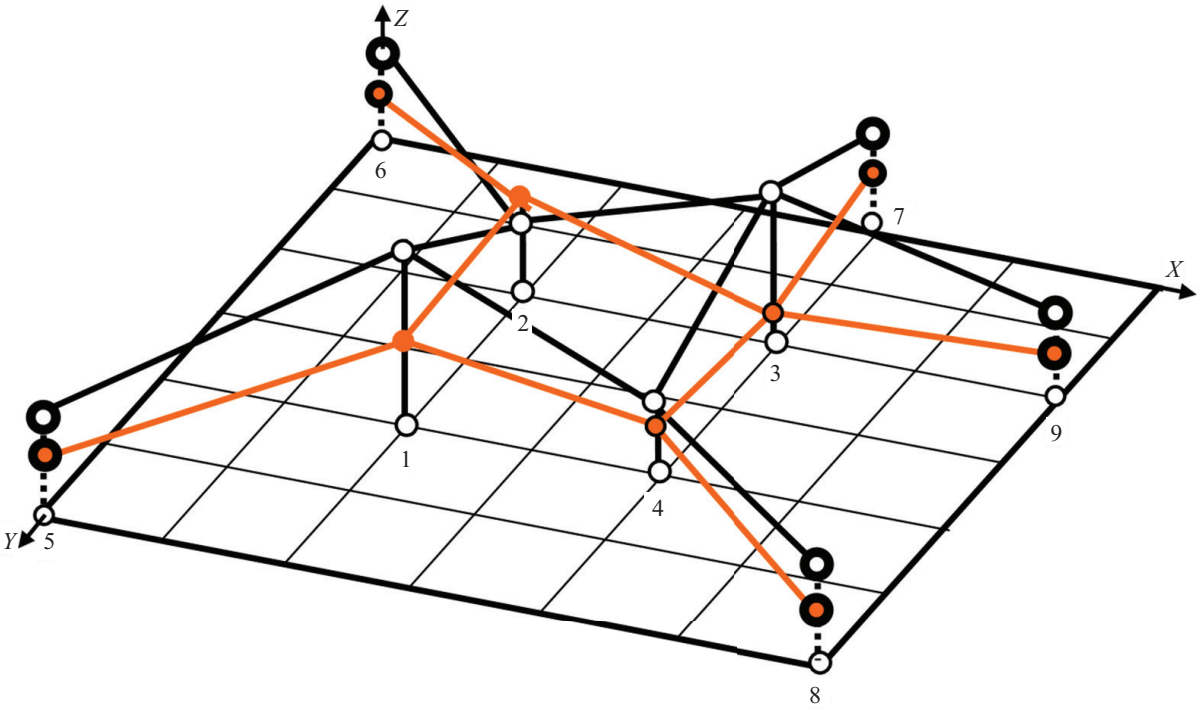


Рис. 8. Общий вид групповой прицельной связи (пример расчета)

Fig. 8. The general appearance of the group targeted connection (calculation example)

частоты остались прежними. Эти результаты теста с достаточной точностью подтверждают «прицельность» групповой связи.

Близость результатов, приведенных в табл. 8 и 11, подтверждает достоверность предложенного подхода.

Рассмотрим случай, когда условия эксплуатации требуют, чтобы длины стоек отдельных прицельных связей были больше 0,08 м. Стойки отдельной при-

цельной связи, повышающей четвертую собственную частоту, соответствуют этому условию. Среди стоек отдельной прицельной связи, повышающей третью собственную частоту:

$$l_{s[3]} = 0,03945 \text{ м} < 0,08 \text{ м},$$

что нарушает поставленное условие. Поэтому сдвиг этой первоначально образованной прицельной связи

Табл. 12. Координаты z узлов групповой прицельной связи (пример расчета)

Table 12. The z coordinates of the nodes of the group targeted connection (calculation example)

Номер узла Node Number	Координаты z / z coordinates	
	Черное / Black	Красное / Red
1	1,25	0,76
2	0,4136	0,4578
3	1,0744	0,0994
4	0,4764	0,4177
5	0,85	0,36
6	0,85	0,36
7	0,85	0,36
8	0,85	0,36
9	0,85	0,36

необходимо увеличить, например, с 0,3 до 0,36 м. Теперь измененные длины принимают значения:

$$l_{st}[1] = 0,76 \text{ м}, l_{st}[2] = 0,4578 \text{ м}, \\ l_{st}[3] = 0,0994 \text{ м}, l_{st}[4] = 0,4177 \text{ м}.$$

Формирование групповой прицельной связи в этом случае реализуется так же, как и в предыдущем, но с учетом изменений параметров отдельной прицельной связи, повышающей третью частоту собственных колебаний. Координаты z узлов групповой прицельной связи приведены в табл. 12. Общий вид этой групповой прицельной связи показан на рис. 8.

В этой групповой связи некоторые стержни поясов пересекаются (в пролетах 1–2, 2–6, 2–3). Узлы, в которых стержни пересекаются, конструктивно реализуемы, но их особенности в данной статье не обсуждаются.

Тестовая проверка расчетной схемы этой групповой связи подтвердила ее прицельность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрен способ формирования матрицы дополнительных жесткостей, которой соответствует групповая прицельная связь. Сформулированы требования к отдельным прицельным связям, на основе которых формируется групповая прицельная связь. Предложен алгоритм формирования групповых прицельных связей с учетом сформулированных требований. Проведено тестирование предложенного алгоритма на программных продуктах SCAD и ЛИРА [16–25].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акимов П.А., Ляхович Л.С. Прицельное регулирование спектра частот собственных колебаний упругих пластин с конечным числом степеней свободы масс путем введения дополнительных обобщенных связей и обобщенных кинематических устройств // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 57–68. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-57-68. EDN MTJJRS.

2. Гитерман Д.М., Ляхович Л.С., Нудельман Я.Л. Алгоритм создания резонансно-безопасных зон при помощи наложения дополнительных связей // Динамика и прочность машин. 1984. № 39. С. 63–69.

3. Ляхович Л.С. Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений : монография. Томск : Издательство ТГАСУ, 2009. 371 с. EDN QNOOHF.

4. Ляхович Л.С., Акимов П.А. О формировании расчетных схем некоторых дополнительных связей для упругих систем. Часть 1. Теоретические основы подхода // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 4–10. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.04-10. EDN GPKYQS.

5. Ляхович Л.С., Акимов П.А., Мешеулов Н.В. О формировании расчетных схем некоторых дополнительных связей для упругих систем. Часть 2. Примеры расчета // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 11–19. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.11-19. EDN DXMYXN.

6. Ляхович Л.С., Малеткин О.Ю. О прицельном регулировании собственных частот упругих систем // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1990. № 1. С. 113–117.

7. Нудельман Я.Л., Ляхович Л.С., Гитерман Д.М. О наиболее податливых связях наибольшей жесткости // Вопросы прикладной механики и математики. 1981. С. 113–126.

8. Akimov P.A., Lyakhovich L.S. Aimed Control of the Frequency Spectrum of Eigenvibrations of Elastic Plates with a Finite Number of Degrees of Mass Freedom by Introducing Additional Generalized Kinematic Devices // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 4. Pp. 181–187. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-181-187

9. Lyakhovich L.S., Akimov P.A. Aimed control of the frequency spectrum of eigenvibrations of elastic plates with a finite number of degrees of freedom of masses by superimposing additional constraints // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 2. Pp. 76–82. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-76-82

10. Lyakhovich L.S., Akimov P.A. Formation of Computational Schemes of Additional Targeted Constraints That Regulate the Frequency Spectrum of Natural Oscillations of Elastic Systems with a Finite Number of Degrees of Mass Freedom, the Directions of Movement of Which are Parallel, But Do Not Lie in the Same Plane. Part 1: Theoretical Foundations // International Journal for

Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 2. Pp. 184–192. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-184-192

11. *Lyakhovich L.S., Akimov P.A.* Formation of Computational Schemes of Additional Targeted Constraints That Regulate the Frequency Spectrum of Natural Oscillations of Elastic Systems with a Finite Number of Degrees of Mass Freedom, the Directions of Movement of Which are Parallel, But Do Not Lie in the Same Plane. Part 2: The First Sample of Analysis // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 3. Pp. 137–146. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-3-137-146

12. *Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Mescheulov N.V.* Formation of computational schemes of additional targeted constraints that regulate the frequency spectrum of natural oscillations of elastic systems with a finite number of degrees of mass freedom, the directions of movement of which are parallel, but do not lie in the same plane. Part 3. The second sample of analysis and conclusion // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 4. Pp. 71–81. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-4-71-81

13. *Liu F., Song L., Jiang M.* Space-time generalized finite difference method for solving the thin elastic plate bending under dynamic loading // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2022. Vol. 143. Pp. 632–638. DOI: 10.1016/j.enganabound.2022.07.015

14. *Yu Q.* Wavelet-based homotopy method for analysis of nonlinear bending of variable-thickness plate on elastic foundations // Thin-Walled Structures. 2020. Vol. 157. P. 107105. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107105

15. *Zhou Y., Huang K.* Static and dynamic stabilities of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plates // European Journal of Mechanics — A/Solids. 2024. Vol. 108. P. 105426. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2024.105426

16. *Fialko S.* Parallel finite element solver for multi-core computers with shared memory // Computers & Mathematics with Applications. 2021. Vol. 94. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.camwa.2021.04.013

17. *Fialko S.* Parallel finite element solver PARFES for the structural analysis in NUMA architecture // Advances

in Engineering Software. 2022. Vol. 174. P. 103290. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2022.103290

18. *Fialko S.* Time history analysis of buildings and structures design models in SCAD software on multicore computers // ECMS 2024 : Proceedings of the 38th ECMS International Conference on Modelling and Simulation. 2024. Pp. 187–193. DOI: 10.7148/2024-0187

19. *Fialko S.* Block Subspace Iteration Method for Structural Analysis on Multicore Computers // Annals of Computer Science and Information Systems. 2022. Vol. 30. Pp. 457–465. DOI: 10.15439/2022F42

20. *Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V.* Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (102). DOI: 10.34910/MCE.102.14. EDN ZVLLVV.

21. *Karpilovsky V., Kriksunov E., Perelmuter A., Yurchenko V.* Analysis and design of structural steel joints and connection: software implementation // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 2. Pp. 58–66. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-57-65

22. *Karpilovsky V.* Finite Elements for the Analysis of Reissner-Mindlin Plates With Joint Interpolation of Displacements and Rotations (JIDR) // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 48–62. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-48-62

23. *Karpilovsky V.S.* Finite Elements of the Plane Problem of the Theory of Elasticity with Drilling Degrees of Freedom // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2020. Vol. 16. Issue 1. Pp. 48–72. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-1-48-72

24. *Теплых А.В., Ожогин Р.Б.* Новые возможности SCAD Office 21.1.9.5 // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 41–47. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.41-47. EDN IWCGLR.

25. *Уткина В.Н., Безрукова Е.С.* Исследование устойчивости конструктивной системы высотного общественного здания в программных комплексах ЛИРА-САПР и STARKES // Эксперт: теория и практика. 2020. № 3 (6). С. 69–73. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10028. EDN RPTXNF.

Поступила в редакцию 28 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 9 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирек Энварович Файзуллин** — кандидат экономических наук, доцент, министр; **Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации**; 119435, г. Москва, ул. Большая Пироговская, д. 23; minstroyrf@minstroyrf.gov.ru;

Леонид Семенович Ляхович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН); **Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)**; 634003, г. Томск, Соляная пл., д. 2; lls@tsuab.ru;

Павел Алексеевич Акимов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и прикладной математики, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН); **Нацио-**

нальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; AkimovPA@mgsu.ru;

Заур Рашидович Галяутдинов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; **Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)**; 634003, г. Томск, Соляная пл., д. 2; gazr@yandex.ru;

Андрей Сергеевич Пляскин — кандидат технических наук, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций; **Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)**; 634003, г. Томск, Соляная пл., д. 2; plyaskinandrei@mail.ru.

Вклад авторов:

Файзуллин И.Э. — введение, анализ актуальности и практической значимости.

Ляхович Л.С. — научное руководство, идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Акимов П.А. — дополнительный сбор материала, дополнительная обработка материала, участие в написании статьи, дополнительное редактирование текста.

Галяутдинов З.Р. — верификация разработанного подхода, дополнительный сбор материала, дополнительная обработка материала, участие в написании статьи.

Пляскин А.С. — верификация разработанного подхода, дополнительный сбор материала, дополнительная обработка материала, участие в написании статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Akimov P.A., Lyakhovich L.S. Precision control for eigen-frequency of elastic plates with finite number of mass degrees of freedom by using additional generalized connections and kinematic devices. *Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(4):57-68. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-57-68. EDN MTJJRS. (rus.).
2. Giterman D.M., Lyakhovich L.S., Nudelman Ya.L. Algorithm for creating resonance-safe zones by imposing additional connections. *Dynamics and Strength of Machines*. 1984; 39:63-69. (rus.).
3. Lyakhovich L.S. *Special properties of optimal systems and the main directions of their implementation in the methods of structural analysis*. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building, 2009; 371. EDN QNOOHF. (rus.).
4. Lyakhovich L.S., Akimov P.A. About development of computational schemes of some additional constraints for elastic systems. Part 1: theoretical foundations. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 9:4-10. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.04-10. EDN GPKYQS. (rus.).
5. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Mescheulov N.V. About development of computational schemes of some additional constraints for elastic systems. Part 2: samples of analysis. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 9:11-19. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.11-19. EDN DXMYXN. (rus.).
6. Lyakhovich L.S., Maletkin O.Ju. O On targeted control of natural frequencies of elastic systems. *News of higher educational institutions. Construction*. 1990; 1:113-117. (rus.).
7. Nudelman Ya.L., Lyakhovich L.S., Gitterman D.M. On the most flexible connections of the greatest rigidity. *Questions of Applied Mechanics and Mathematics*. 1981; 113-126. (rus.).
8. Akimov P.A., Lyakhovich L.S. Aimed Control of the Frequency Spectrum of Eigenvibrations of Elastic Plates with a Finite Number of Degrees of Mass Freedom by Introducing Additional Generalized Kinematic Devices. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(4):181-187. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-181-187
9. Lyakhovich L.S., Akimov P.A. Aimed control of the frequency spectrum of eigenvibrations of elastic plates with a finite number of degrees of freedom of masses by superimposing additional constraints. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(2):76-82. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-76-82
10. Lyakhovich L.S., Akimov P.A. Formation of Computational Schemes of Additional Targeted Constraints That Regulate the Frequency Spectrum of Natural Oscillations of Elastic Systems with a Finite Number of Degrees of Mass Freedom, the Directions of Movement of Which are Parallel, But Do Not Lie in the Same Plane. Part 1: Theoretical Foundations. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(2):184-192. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-184-192
11. Lyakhovich L.S., Akimov P.A. Formation of Computational Schemes of Additional Targeted Constraints That Regulate the Frequency Spectrum of Natural Oscillations of Elastic Systems with a Finite Number of Degrees of Mass Freedom, the Directions of Movement of Which are Parallel, But Do Not Lie in the Same Plane. Part 2: The First Sample of Analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(3):137-146. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-3-137-146

12. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Mescheulov N.V. Formation of computational schemes of additional target-ed constraints that regulate the frequency spectrum of natural oscillations of elastic systems with a finite number of degrees of mass freedom, the directions of movement of which are parallel, but do not lie in the same plane. Part 3. The second sample of analysis and conclusion. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(4):71-81. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-4-71-81
13. Liu F., Song L., Jiang M. Space-time generalized finite difference method for solving the thin elastic plate bending under dynamic loading. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2022; 143:632-638. DOI: 10.1016/j.enganabound.2022.07.015
14. Yu Q. Wavelet-based homotopy method for analysis of nonlinear bending of variable-thickness plate on elastic foundations. *Thin-Walled Structures*. 2020; 157:107105. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107105
15. Zhou Y., Huang K. Static and dynamic stabilities of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plates. *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2024; 108:105426. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2024.105426
16. Fialko S. Parallel finite element solver for multi-core computers with shared memory. *Computers & Mathematics with Applications*. 2021; 94:1-14. DOI: 10.1016/j.camwa.2021.04.013
17. Fialko S. Parallel finite element solver PARFES for the structural analysis in NUMA architecture. *Advances in Engineering Software*. 2022; 174:103290. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2022.103290
18. Fialko S. Time history analysis of buildings and structures design models in SCAD software on multicore computers. *ECMS 2024: Proceedings of the 38th ECMS International Conference on Modelling and Simulation*. 2024; 187-193. DOI: 10.7148/2024-0187
19. Fialko S. Block Subspace Iteration Method for Structural Analysis on Multicore Computers. *Annals of Computer Science and Information Systems*. 2022; 30:457-465. DOI: 10.15439/2022F42
20. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 2(102). DOI: 10.34910/MCE.102.14. EDN ZVLLVV.
21. Karpilovsky V., Kriksunov E., Perelmuter A., Yurchenko V. Analysis and design of structural steel joints and connection: software implementation. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(2):58-66. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-57-65
22. Karpilovsky V. Finite Elements for the Analysis of Reissner-Mindlin Plates With Joint Interpolation of Displacements and Rotations (JIDR). *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(3):48-62. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-48-62
23. Karpilovsky V.S. Finite Elements of the Plane Problem of the Theory of Elasticity with Drilling Degrees of Freedom. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020; 16(1):48-72. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-1-48-72
24. Teplikh A.V., Ozhogin R.B. New Features in SCAD Office 21.1.9.5. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 4:41-47. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.41-47. EDN IWCGLR. (rus.).
25. Utkina V.N., Bezrukova E.S. Investigation of the stability of the structural system of a high-rise public building in the software complexes LIRA-CAD and STARKES. *Expert. Theory and Practice*. 2020; 3(6):69-73. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10028. EDN RPTXNF. (rus.).

Received December 28, 2024.

Adopted in revised form on December 28, 2024.

Approved for publication on January 9, 2025.

B I O N O T E S : **Irek E. Faizullin** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Minister; **Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation**; 23 Bolshaya Pirogovskaya st., Moscow, 119435, Russian Federation; minstroyrf@minstroyrf.gov.ru;

Leonid S. Lyakhovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Structural Mechanics, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS); **Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB)**; 2, Solyanaya st., Tomsk, 634003, Russian Federation; lls@tsuab.ru;

Pavel A. Akimov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Sciences, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; AkimovPA@mgsu.ru;

Zaur R. Galautdinov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB)**; 2, Solyanaya st., Tomsk, 634003, Russian Federation; gazr@yandex.ru;

Andrey S. Plyaskin — Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Steel and Wooden Structures; **Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB)**; 2, Solyanaya st., Tomsk, 634003, Russian Federation; plyaskinandrei@mail.ru.

Contribution of the authors:

Irek E. Faizullin — introduction, analysis of relevance and practical significance.

Leonid S. Lyakhovich — scientific supervision, idea, collection of materials, processing of materials, writing the article, scientific editing of the text.

Pavel A. Akimov — additional collection of materials, additional processing of materials, participation in writing the article, additional editing of the text.

Zaur R. Galautdinov — verification of the developed approach, additional collection of materials, additional processing of materials, participation in writing the article.

Andrey S. Plyaskin — verification of the developed approach, additional collection of materials, additional processing of materials, participation in writing the article.

The authors declare no conflict of interest.

Исследование свойств крупнотоннажных продуктов лесохимии как пластификаторов дорожных битумов

Дмитрий Юрьевич Небрatenко¹, Александр Николаевич Жемерикин²,
Дмитрий Иванович Лямкин²

¹ Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)); г. Москва, Россия;

² Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева);
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение транспортной нагрузки на автомобильные дороги вследствие роста грузоперевозок автомобильным транспортом и смещения деловой активности в области Урала, Сибири и Дальнего Востока требуют обеспечения удовлетворительных межремонтных сроков покрытий автомобильных дорог в жестких природно-климатических условиях. При этом планомерное увеличение глубины переработки нефти приводит к снижению содержания предельных низкомолекулярных углеводородов в составе битумов нефтяных дорожных вязких окисленных, повсеместно применяющихся на территории нашей страны. Поэтому все более актуальной становится задача повышения низкотемпературных характеристик битума и модифицированных вяжущих на его основе. Перспективным во многих отношениях является применение для указанных целей побочных продуктов лесопереработки и лесохимии, производство которых сосредоточено в основном в регионах, где требуются марки битумов с повышенной морозостойкостью.

Материалы и методы. В качестве исследуемых материалов рассмотрены традиционные для России битумы нефтяные дорожные вязкие окисленные марки БНД 70/100 и образцы пека таллового, крупнотоннажно получающегося в ходе лесопереработки на ряде отечественных предприятий. С целью определения специфических для исследуемых образцов физико-механических характеристик были использованы методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа.

Результаты. Представлены результаты комплексных исследований возможности применения растительных пластификаторов — продуктов лесопереработки и лесохимии в качестве регуляторов физико-механических свойств комплексных дорожных вяжущих, термогравиметрический анализ компонентного состава битумов, а также товарных продуктов лесопереработки.

Выводы. Разработанные на основании комплекса проведенных практических исследований рекомендации позволяют прогнозировать улучшение эксплуатационных показателей смесевых вяжущих при изменении их физико-химического состава на этапе подготовки к производству асфальтобетонных смесей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битумы нефтяные дорожные, талловый пек, дифференциальная сканирующая калориметрия, термогравиметрический анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Небрatenко Д.Ю., Жемерикин А.Н., Лямкин Д.И. Исследование свойств крупнотоннажных продуктов лесохимии как пластификаторов дорожных битумов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 73–83. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.73-83

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Небрatenко, nebratenko@mail.ru.

Investigation of the properties of large-tonnage products of forest chemistry as plasticizers of road bitumen

Dmitry Yu. Nebratenko¹, Alexander N. Zhemerikin², Dmitry I. Lyamkin²

¹ Russian University of Transport (RUT (MIIT)); Moscow, Russian Federation;

² D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An increase in the transport load on highways due to the growth of freight transportation by road and shift of business activity in the Urals, Siberia and the Far East require ensuring satisfactory inter-repair terms of road surfaces in harsh natural and climatic conditions. At the same time, a systematic increase in the depth of oil refining leads to a decrease in the content of marginal low molecular weight hydrocarbons in the composition of oxidized petroleum bitumen, which are widely used in our country. Therefore, the task of increasing the low-temperature characteristics of bitumen and modified binders based on it is becoming more and more urgent. Promising in many respects is the use of by-products of wood processing and forestry chemistry for the above purposes, the production of which is concentrated mainly in regions where frost-resistant bitumen grades are required.

Materials and methods. As the materials under study, we considered the traditional Russian bitumen oil road oxidized grades BND 70/100 and specimens of tall pitch, which is produced in large quantities during wood processing at a number of domestic enterprises. Methods of differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis were used to determine the physico-mechanical characteristics specific to the studied specimens.

Results. The paper presents the results of comprehensive studies of the possibility of using plant plasticizers — products of wood processing and forestry chemistry as regulators of the physico-mechanical properties of complex road binders, thermogravimetric analysis of the component composition of bitumen, as well as commercial products of wood processing.

Conclusions. The recommendations developed on the basis of a set of practical studies allow us to predict an improvement in the performance of mixed binders when their physico-chemical composition changes at the stage of preparation for the production of asphalt concrete mixtures.

KEYWORDS: road oil bitumen, tall pitch, differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis

FOR CITATION: Nebratenko D.Yu., Zhemerikin A.N., Lyamkin D.I. Investigation of the properties of large-tonnage products of forest chemistry as plasticizers of road bitumen. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):73-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.73-83 (rus.).

Corresponding author: Dmitry Yu. Nebratenko, nebratenko@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Большая территория Российской Федерации объясняет постоянную потребность в расширении сети транспортного сообщения: водных (речной и морской), авиационных и наземных (автомобильный и железнодорожный) видов транспорта. Однако очевидно, что наиболее востребованными для подавляющего большинства населения страны остается автомобильный транспорт. Для обеспечения надежного и безопасного дорожного движения необходимо улучшать не только технические характеристики автомобилей и автобусов, повышать культуру обслуживания и эксплуатации автотранспорта, но и обращать постоянное внимание на состояние российских автомобильных дорог [1–3].

Решающим компонентом для обеспечения прочности, монолитности, водо- и морозостойкости, и других технологических и эксплуатационных показателей автомобильных дорог является битумное вяжущее, состав которого характеризует конечные свойства асфальтобетонного покрытия в течение всего срока его службы. Для России, где значительная часть территории расположена в суровых климатических условиях, низкотемпературные показатели вяжущих имеют решающее значение, поскольку, наряду с колееобразованием, отвечают за увеличение межремонтных сроков дорожных покрытий [4, 5].

Битум — это натуральная или искусственная смесь углеводородов сложного переменного состава, содержащая примеси металлов, азота, серы и других элементов. Этот продукт имеет черный окрас и твердую или смолоподобную структуру. Разные виды битума используются в строительной сфере, лакокрасочном и химическом производстве и др. [6, 7]. Главное предназначение битумных вяжущих в асфальтобетонных смесях — соединение их компонентов: щебня, песка, минеральных элементов, при сохранении требуемых коэффициентов прочности и пластичности в широком температурном диапазоне эксплуатации [7–9].

Компонентный состав битума к настоящему моменту изучен достаточно хорошо. Набирающая

сегодня активность методология S.A.R.A. группирует из традиционных наиболее весомых классов компонентов (масла, смолы и асфальтены) в составе битумов четыре группы продуктов: насыщенные (Saturates), ароматические (Aromatics), смолы (Resins) и асфальтены (Asphaltenes). В начале XX в. SARA-анализ был предложен ученым-исследователем У. Ричардсоном, а затем усовершенствован И. Маркуссоном. Метод основан на разделении нефти на насыщенные углеводороды, ароматические соединения, смолы и асфальтены по их растворимости и полярности [10].

Насыщенные углеводороды не являются полярными и не содержат двойных связей. К ним относятся алканы с линейной или разветвленной основной цепью, а также циклоалканы (нафтены) [11]. Группа ароматических углеводородов включает производные структуры бензола. Советская научная школа дополнительно классифицировала ароматические углеводороды на моно-, ди- и триароматические соединения в зависимости от числа ароматических колец в молекуле [7, 9].

Смоляные компоненты битума, как правило, состоят из полярных макромолекул, содержащих гетероатомы: кислород, азот, серу и/или ряд других. По своей структуре смолы напоминают асфальтены, но отличаются существенно меньшей молекулярной массой. При этом нафтенновые кислоты, также входящие в состав битумов, рассматриваются как составляющие фракции смолы [12].

Асфальтены — наиболее высокомолекулярные соединения, составляющие традиционные окисленные битумы. Асфальтеновая фракция содержит большой процент гетероатомов (O, S, N и прочее) и металлоорганических компонентов (Ni, V, Fe и прочее). Они характеризуются молекулярной массой в диапазоне от 500 до 2000 г/моль [4, 5, 13].

Варьированием соотношения компонентных групп в битуме можно направленно влиять как на текущие свойства исходного битумного вяжущего, так и на их изменение в ходе эксплуатации дорог. На текущем этапе развития нефтедобычи и нефтепереработки наиболее экологически полезным вариантом регулиро-

вания показателей следует признать введение в состав нефтяных дорожных вяжущих товарных и/или не товарных продуктов лесопереработки/лесохимии, которые в настоящий момент утилизируются по большей части путем сжигания. Среди остаточных продуктов такого типа: талловый пек (ТП), дистиллированное (ДТМ) и легкое (ЛТМ) талловые масла, а также жирные кислоты таллового масла (ЖКТМ) [14–16].

Талловый пек представляет собой плавкий остаток от перегонки сырого таллового масла и является многотоннажным побочным продуктом сульфат-целлюлозного производства. Это вязкотекучее вещество темно-коричневого цвета, обладающее клеящими свойствами. Около 70 % пека составляют нейтральные и окисленные высокомолекулярные органические соединения, а оставшиеся 30 % — это смоляные и жирные кислоты, которые часто находятся в полимеризованном состоянии. Известно, что применение ТП позволяет улучшить сцепление битума с поверхностью каменных материалов основных пород [17–20].

Дистиллированное талловое масло — побочный продукт сульфатно-целлюлозного производства, представляет большой интерес для лесохимических и целлюлозно-бумажных предприятий. При увеличении в исходном растительном сырье доли лиственных пород в составе ДТМ возрастает содержание жирных кислот и нейтральных веществ [9, 10]. Под действием высокой температуры жирные кислоты ДТМ реагируют с высшими спиртами — главными компонентами нейтральных веществ, образуя труднолетучие эфиры [21, 22].

Жирные кислоты таллового масла — маслянистая жидкость светло-желтого цвета, состоящая из смеси высокомолекулярных ненасыщенных органических кислот (C18–C20). В состав смеси жирных кислот входят олеиновая, линолевая, линолиновая кислоты и их изомеры. Фракция жирных кислот получается после отделения фракций ТП, талловой какифоли и ДТМ [23–25].

Существенным аргументом в пользу использования растительных компонентов для регулирования показателей нефтяных дорожных битумов являются их ежегодная возобновляемость, а также возрастающий спрос на нефтяное сырье. Поэтому в настоящем исследовании для регулирования технических показателей битума был рассмотрен пек талловый, крупнотоннажно выпускаемый на шести предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности — Котласском, Соломбальском, Сегежском ЦБК, Селенгинском ЦКК, Братском и Усть-Илимском ЛПК в ежегодном объеме порядка 25 тыс. т [20]. Доступность пластифицирующего компонента в регионах его исключительно важного применения также служит дополнительным аргументом для проведения широкого круга исследований влияния растительных компонентов на свойства смесевых систем на основе нефтяного битума.

Поэтому в ходе исследования была поставлена задача выполнения комплекса физико-механических и термогравиметрических испытаний как базового битума, так и использованного в работе потенциального пластификатора — таллового пека — с целью изучения совместимости нефтяного и растительного компонентов для получения вяжущего с целевым комплексом свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании использовался битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 70/100 (АО «Газпромнефть – Московский НПЗ»), соответствующий требованиям ГОСТ 33133–2014 (табл. 1).

Второй компонент смеси — талловый пек — многотоннажный побочный продукт сульфат-целлюлозного производства, образующийся при перегонке таллового масла. Являясь доступным и относительно дешевым возобновляемым сырьем растительного происхождения и обладая ценными свойствами, ТП в настоящее время не находит достаточно квалифицированного применения, и значительная его часть утилизируется путем сжигания. Талловый пек, по-

Табл. 1. Паспортные показатели битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100

Table 1. Passport parameters of BND 70/100

Глубина проникания иглы при температуре 25 °С 0,1 мм Needle penetration depth at 25 °C 0.1 mm	Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	Растяжимость при 0 °С, см Extensibility, at 0 °C, cm	Температура хрупкости, °С Brittleness temperature, °C	Температура вспышки, °С Flash point, °C
81	49,0	3,7	–19	280

Табл. 2. Компонентный состав таллового пека (Котласский ЦБК) [20]

Table 2. The component composition of tall pitch (Kotlas pulp and paper mill) [20]

Смоляные кислоты, % масс. Resin acids, % by weight	Неомыляемые вещества, % масс. Unsaponifiable substances, % by weight	Окисленные продукты, % масс. Oxidized products, % by weight	Жирные кислоты, % масс. Fatty acids, % by weight
10–20	70–90	10–30	Остальное / Other

Табл. 3. Данные SARA-анализа образцов промышленной партии таллового пека*
Table 3. Data from the SARA analysis of specimens of an industrial batch of tall pitch*

Насыщенные углеводороды, % масс. Saturated hydrocarbons, % by weight	Ароматические углеводороды, % масс. Aromatic hydrocarbons, % by weight	Смолы, % масс. Resins, % by weight	Асфальтены*, % масс. Asphaltenes*, % by weight
0,150	0,263	97,131	2,456

Примечание: * — метод тонкослойной хроматографии, реализованный на приборе Iatroscan MK-6S, в соответствии со стандартом IP 469/01–2006 предназначен для определения содержания насыщенных, ароматических и полярных соединений в нефтепродуктах методом тонкослойной хроматографии с использованием ионно-плазменного детектора (ПИД)¹.
Note: * — thin-layer chromatography method implemented on the device Iatroscan MK-6S, in accordance with the standard IP 469/01–2006 is designed to determine the content of saturated, aromatic and polar compounds in petroleum products by thin-layer chromatography using ion-plasma detector (IPD)¹.

лучающийся после переработки лесоматериалов на Котласском ЦБК, представляет собой смесь следующего состава (табл. 2) [10].
По данным SARA-анализа (согласно стандарту IP 469/01–2006) использованного в работе ТП, преобладающими компонентами крупнотоннажного продукта являются полярные соединения средней молекулярной массы (табл. 3).

Физико-химические характеристики исследуемых смесевых образцов битума и пластификатора определены с использованием методов дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА) на приборах DSC 851e и TGA 840e соответственно. Система термического анализа — STARe Mettler Toledo. Калибровка модуля DSC проводилась по индию и цинку [26].

Дифференциальная сканирующая калориметрия представляет собой метод термического анализа, ко-

торый определяет, как изменяется теплоемкость материала в зависимости от температуры. То есть метод основан на измерениях теплоемкости и тепловых эффектов в условиях нагревания/охлаждения образца с заданной скоростью [26, 27].
Термогравиметрический анализ — это экспериментальный метод, при котором масса образца непрерывно измеряется и рассматривается как функция температуры или времени [26–28].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ДСК-термограммы исследуемых образцов были записаны со скоростью 10 град/мин в интервале температур от –70 до +100 °С, измерительная ячейка продувалась воздухом со скоростью 50 мл/мин. Образцы массой от 20 до 35 мг помещали в алюминиевую кювету объемом 40 мкл, крышку кюветы завальцовывали.

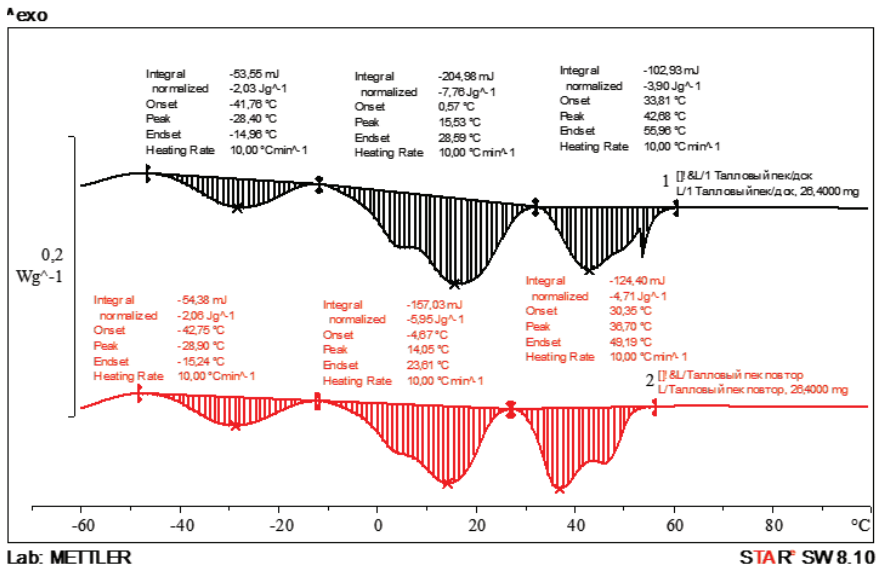


Рис. 1. ДСК-термограммы таллового пека: 1 — исходный образец; 2 — повторное сканирование
Fig. 1. DSC-thermograms of tall pitch: 1 — initial specimen; 2 — repeated scanning

¹ IP 469/01–2006. Determination of saturated, aromatic and polar compounds in petroleum products by thin layer chromatography and flame ionization detection : introduced in 2001. 10 p.

Табл. 4. Характеристические параметры эндотермических эффектов таллового пека

Table 4. Characteristic parameters of the endothermic effects of tall pitch

Пик/повтор Peak/repeat	Характеристические параметры / Characteristic parameters			
	$T_{\text{нач}}^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{beg}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{пик}}^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{peak}}^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_{\text{пл}}^{\circ}\text{Дж/г}$ $\Delta H_{\text{melt,p}}^{\circ}\text{J/g}$	$T_{\text{кон}}^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{end}}^{\circ}\text{C}$
1	-42/-43	-28/-29	2,0/2,0	-15/-15
2	0,6/-5	15,5/14	7,8/6	28/24
3	34/30	43/37	4/4,7	56/49

Ниже приведены термограммы образцов таллового пека (рис. 1) и битума нефтяного дорожного (рис. 2). На всех рисунках под номером 1 отображены термограммы, полученные в ходе первого сканирования образцов. Для образцов ТП и битума также проведено повторное сканирование тех же образцов с целью исключить влияние термической предыстории (кривые под номером 2).

В ходе нагрева сложных многокомпонентных смесевых композиций, которыми выступают все исследуемые в работе составы, могут происходить как физические процессы, связанные с фазовыми или релаксационными переходами, так и химические реакции. Они сопровождаются изменением энтальпии и теплоемкости, что позволяет их исследовать методом ДСК.

Процесс плавления ТП сопровождается поглощением тепла, т.е. это эндотермический процесс. Для типичных кристаллов низкомолекулярных соединений процесс плавления происходит при четко определенной температуре плавления и характеризуется величиной энтальпии плавления, которые являются константами для данного конкретного соединения. Однако ни температура, ни энтальпия плавления ТП константами не являются. Это связано с тем, что указанный образец, представляющий

собой многокомпонентную смесь остатков переработки растительного сырья с макромолекулами разной молекулярной массы и строения, и кристаллитов, образующих их структуру, может иметь переменный состав и разную степень упорядочения. Наличие в структуре ТП аморфных участков уменьшает значение энтальпии плавления в расчете на 1 г образца. На рис. 1 представлены термограммы плавления образца частично закристаллизовавшегося таллового пека. Его плавление сопровождается тремя эндотермическими интервалами (при температурных диапазонах минус 40–10 °С, 0–20 °С и 30–55 °С), причем пики 2 и 3 наиболее широкие и интенсивные. Это позволяет говорить о несколько большем содержании в исследуемом образце компонентов со средней и большей молекулярной массой.

На всех пиках можно отчетливо выделить точку перегиба, соответствующую началу процесса плавления. В этом случае вместо «истинной» температуры плавления низкомолекулярных веществ $T_{\text{пик}}$, соответствующей точке плавления, в данном случае определяют значение $T_{\text{пик}^{*}}$, отвечающее экстремуму на термограмме плавления. По физическому смыслу этой температуре соответствует максимальное количество декристаллизующегося вещества.

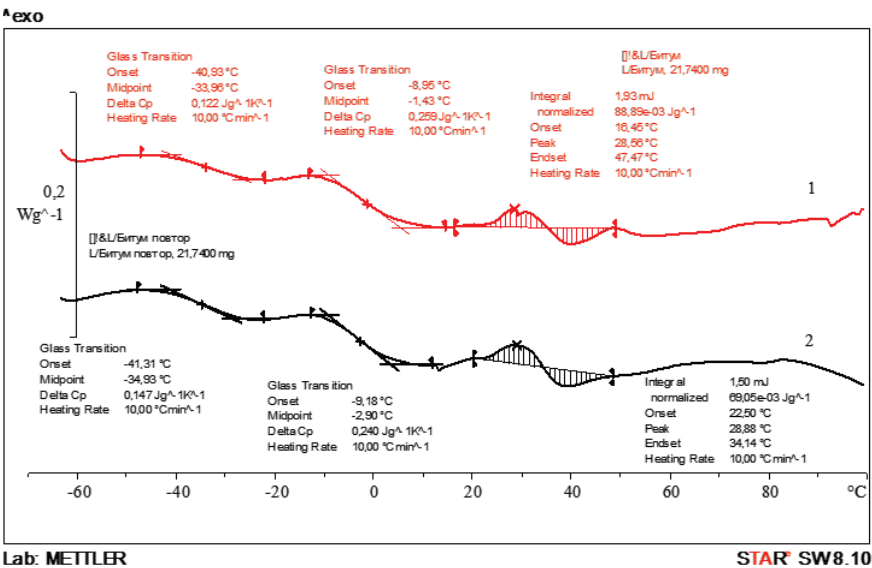


Рис. 2. ДСК-термограммы битума нефтяного дорожного БНД 70/100: 1 — исходный образец; 2 — повторное сканирование

Fig. 2. DSC-thermograms of bitumen of petroleum road BND 70/100: 1 — initial specimen; 2 — repeated scanning

На термограммах 1 и 2 ТП в интервале температур от -70 до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1) присутствуют три эндотермических эффекта, связанных фазовыми переходами из стеклообразного/кристаллического в вязкое/вязкотекучее состояние различных фракций, входящих в состав пека. Для первой и второй кривой в поле графика приведены интегральные показатели для каждого из трех пиков: при $-28,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, при 18 и при $42,68\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При повторном сканировании все эффекты хорошо воспроизводятся. Небольшое смещение второго и третьего эффектов, возможно, связано с неполной кристаллизацией в ходе повторного охлаждения [29–32]. Характеристики указанных выше эффектов приведены в табл. 4.

Термограммы битума также имеют сложный характер, что связано с его многокомпонентным и переменным составом. Молекулы разных фракций нефтяного битума после охлаждения из расплава при комнатной температуре имеют различное время и кинетические условия для формирования надмолекулярных структур. Профиль термограммы свидетельствует о том, что в интервале температур от -70 до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ термического разложения битума не происходит (рис. 2). В ходе проведения анализа ДСК-кривой подобного типа возможно несколько вариантов расположения базовых линий. При этом отмечается неоднозначность в идентификации термических эффектов и сомнительная адекватность их интерпретации [33, 34].

Предполагается, что температурный диапазон стеклования битумов обусловлен холодной кристаллизацией. Зафиксированные в «застеклованном» состоянии после быстрого охлаждения (от комнатной температуры) компоненты битума при медленном нагреве приобретают подвижность и быстро

формируют несовершенные кристаллы небольших размеров [34]. Подтверждением может служить сопоставительный анализ данных на рис. 2 и 3, на которых представлена повторная серия ДТА-кривой для того же образца битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100. Однозначно интерпретировать различия сложно, однако необходимо отметить, что в исследованной области температур также происходит переход битума из твердого в вязкопластичное состояние. Иными словами, наблюдается размягчение вследствие плавления компонентов, составляющих битум. В данном случае (рис. 3) также было изменено положение базовой линии, что позволило более достоверно отобразить релаксационные процессы, происходящие с битумом в процессе нагревания/охлаждения. Предположительно каждому пику на ДТА-кривой соответствует изменение фазового состояния групп соединений определенного типа компонентного состава битумов: масел, смол и асфальтенов.

Анализ динамики формирования термических эффектов на ДСК-термограммах позволяет полагать, что интенсивность и форма низкотемпературной экзотермы на кривых определяется не только составом, но и количеством высоковязких/твердых углеводородов соответствующих фракций, кристаллизация которых обуславливает ее формирование.

Из анализа ДСК-термограмм видно, что процесс размягчения ТП заканчивается на несколько градусов ниже области плавления битума нефтяного дорожного, однако их ориентационно-кристаллизационные процессы протекают в близких температурных диапазонах. Отмеченное обстоятельство дает основание полагать, что прямое смешение ТП с нефтяным битумом не приведет к существенному изменению низкотемпературных показателей итогового битум-

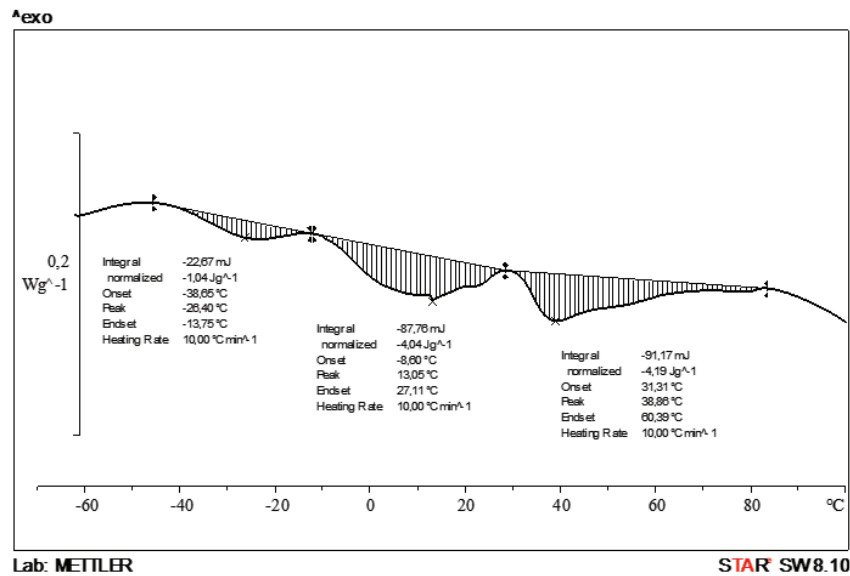


Рис. 3. Однопроходная ДСК-термограмма образца битума БНД 70/100

Fig. 3. Single-pass DSC-thermogram of BND 70/100 bitumen specimen

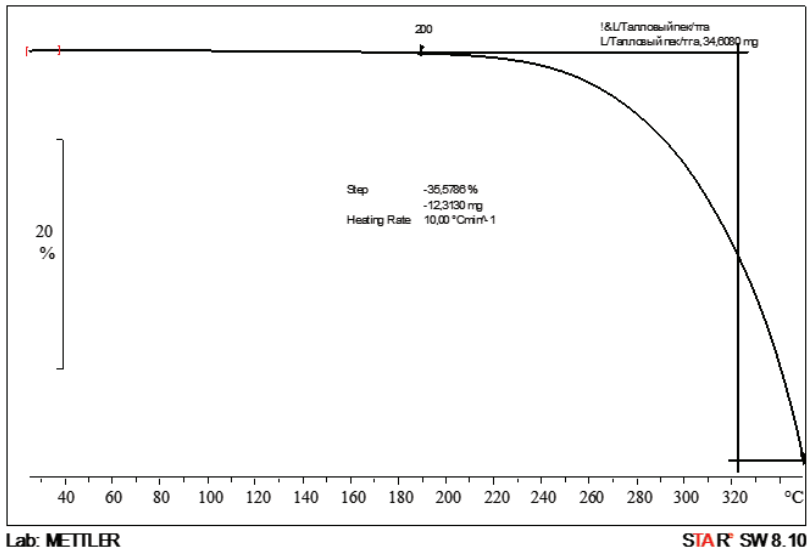


Рис. 4. ТГА-термограмма таллового пека
Fig. 4. TGA-thermogram of tall pitch

ного вяжущего. Однако, учитывая тенденцию по перемещению дорожно-строительных объектов в область северных территорий России, даже понижение температуры растрескивания дорожных вяжущих на 3–5 °С вызовет интерес к такому улучшенному продукту со стороны отраслевых подрядных организаций.

На втором этапе исследований были определены характеристики исследуемых образцов с использованием метода ТГА на приборе TGA 840e системы термического анализа STARe швейцарской фирмы Mettler Toledo в диапазоне температур 25–350 °С при скорости нагрева 10 °С/мин. Исследуемые образцы массой 20–30 мг помещались в открытую кювету из оксида алюминия объемом 70 мл.

В отличие от полимеров с известным химическим составом и строением, стабильными физико-химическими показателями и прогнозируемой деградацией, окисленные нефтяные дорожные битумы и их композиции представляют собой сложную смесь олигомерных продуктов переработки нефти, прежде всего: органические низкомолекулярные масла, нефтяные смолы и асфальтеновые комплексы. Метод ТГА расширяет возможности оценки долговечности нефтяных дорожных битумов различного состава точными методами исследований.

На рис. 4 приведена термограмма термогравиметрического анализа образца ТП. Начало термоокислительной деградации образца находится в области 200–220 °С, что свидетельствует о его достаточно высокой термо-

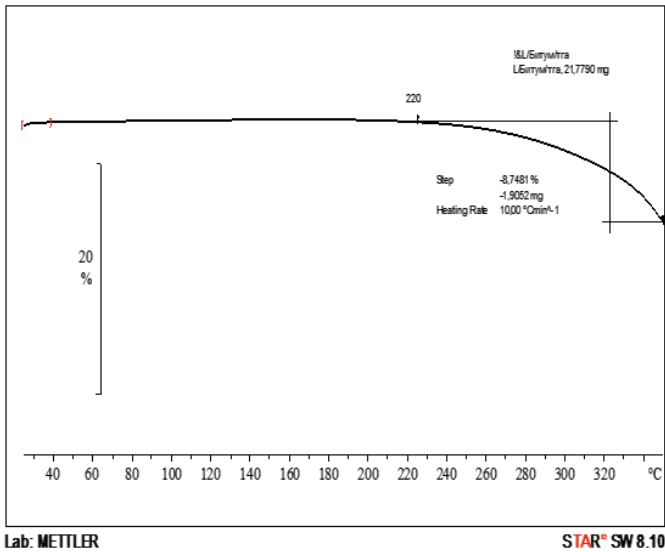


Рис. 5. ТГА-термограмма окисленного дорожного битума БНД 70/100 в среде азота
Fig. 5. TGA-thermogram of oxidized road bitumen BND 70/100 in nitrogen medium

стабильности и о позднем начале глубоких изменений химического состава таллового пека с образованием новых конденсированных высокомолекулярных соединений и последующем активном кислородном старении исследуемого образца ТП (потеря массы 35,6 %).

На рис. 5 представлена ТГА-термограмма образца битума нефтяного дорожного вязкого марки БНД 70/100 в среде азота.

Термограмма потери массы битума (рис. 5) показывает, что основная потеря массы (8, 7 %) происходит в один этап в температурном интервале от 220 до 350 °С с последующим образованием при 450 °С примерно 16–18 % остатка, термостабильного в инертной атмосфере, что хорошо согласуется с данными ранее проведенных исследований [34]. Указанный интервал может возрасти в случае изменения условий переработки и хранения как таллового пека, так и нефтяного битума. Таким образом, термостабильность товарного битума выше, чем аналогичный показатель для таллового пека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании сводного анализа результатов проведенных исследований можно сделать вывод

о принципиальной возможности положительного влияния на свойства битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100 представленных для исследования репрезентативных образцов ТП. Установлено, что плавление пека таллового заканчивается на несколько градусов ниже области плавления битума нефтяного дорожного, при этом их ориентационно-кристаллизационные процессы протекают в близких температурных диапазонах. Это позволяет сделать вывод о совместимости указанных растительных компонентов с традиционными высоковязкими нефтяными продуктами.

Область дальнейших исследований должна быть направлена на изучение свойств смесей вязких товарных и нетоварных продуктов лесопереработки и лесохимии и оптимизации их итогового состава, оценку влияния указанных пластификаторов непосредственно на свойства битумов нефтяных дорожных разных марок и разных производителей и определение закономерностей их влияния на конечные свойства смесевых вяжущих на основе битума, изучение взаимодействия пластификаторов и высокомолекулярных компонентов полимерно-битумных вяжущих и асфальтобетонных смесей на их основе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дубина С.И., Кандрашин В.Г. Качество российских автомобильных дорог // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2006. № 2 (2). С. 48–50. EDN KDNKIZ.
2. Ерофеев В.Т., Ликомаскина М.А., Афонин В.В., Архипова А.И. Стойкость асфальтобетонов в условиях воздействия биосреды // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1358–1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1358-1371. EDN SKBEFD.
3. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 80–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.80
4. Гохман Л.М. Дорожный полимерасфальтобетон. М. : Экон-Информ, 2017. 477 с.
5. Chen M., Javilla B., Hong W., Pan C., Riara M., Mo L. et al. Rheological and Interaction Analysis of Asphalt Binder, Mastic and Mortar // Materials. 2019. Vol. 12. Issue 1. P. 128. DOI: 10.3390/ma12010128
6. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification // Advances in Colloid and Interface Science. 2009. Vol. 145. Issue 1–2. Pp. 42–82. DOI: 10.1016/j.cis.2008.08.011
7. Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. М. : Транспорт, 1973. 261 с.
8. Schaur A., Unterberger S., Lackner R. Impact of molecular structure of SBS on thermomechanical properties of polymer modified bitumen // European Polymer

Journal. 2017. Vol. 96. Pp. 256–265. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2017.09.017

9. Kök B.V., İrhan B., Yılmaz M., Yalçın E. Research on the rheological properties of bitumen modified with waste photopolymer // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 346. P. 128446. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128446

10. Сафина И.Р., Ибрагимова Д.А., Яушев Э.А., Хисмиев Р.Р. Применение метода SARA-анализа для характеристики нефтяных дисперсных систем // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 24. С. 212–213. EDN THNJPH.

11. Adams J.J., Rovani J.F., Planche J.-P., Loveridge J., Literati A., Shishkova I. et al. SAR-AD Method to Characterize Eight SARA Fractions in Various Vacuum Residues and Follow Their Transformations Occurring during Hydrocracking and Pyrolysis // Processes. 2023. Vol. 11. Issue 4. P. 1220. DOI: 10.3390/pr11041220

12. Иванова Л.В., Буров Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2011. № 1. С. 268–284. EDN OOVKYV.

13. Абдрафикова И.М., Каюкова Г.П., Вандюкова И.И., Морозов В.И., Губайдуллин А.Т. Фракционный состав асфальтенов из природных битумов пермских отложений Татарстана // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 3. С. 180–186. EDN NDPLCP.

14. Прокопович С.С. Система учета лесных ресурсов в составе национального богатства страны: оценка состояния и перспективы развития // Труды БГТУ. Экономика и управление. 2011. № 7. С. 102–105. EDN SQTLQT.

15. Zhang R., Wang H., You Z., Jiang X., Yang X. Optimization of bio-asphalt using bio-oil and distilled water // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 165. Pp. 281–289. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.154

16. Ферару Г.С. Эколого-экономические аспекты образования и переработки отходов (на примере лесопромышленного комплекса) // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 2 (82). С. 86–99. EDN MJBGVZV.

17. Головин А.И., Трофимов А.Н., Узлов Г.А. и др. Лесохимические продукты сульфатно-целлюлозного производства. М. : Лесн. промышленность, 1988. 286 с.

18. Исмаилов Р.М., Радбиль А.Б., Радбиль Б.А. Модифицирование таллового пека параформальдегидом // Химия растительного сырья. 2003. № 2. С. 59–64. EDN HYPXXR.

19. Семенычева Л.Л., Маврина Е.А., Ильичев И.С., Щепалов А.А. Анализ свойств таллового пека как исходного сырья для получения связующего пека анодной массы электролизеров для производства алюминия // Химия растительного сырья. 2014. № 4. С. 229–233. EDN TQBWVJ.

20. Исмаилов Р.М., Радбиль А.Б., Радбиль Б.А. Пути квалифицированного использования таллового пека // Химия растительного сырья. 2004. № 2. С. 73–76. EDN HYPYUJ.

21. Chen G., Zhang B., Zhao J., Chen H. Improved process for the production of cellulose sulfate using sulfuric acid/ethanol solution // Carbohydrate Polymers. 2013. Vol. 95. Issue 1. Pp. 332–337. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.03.003

22. Zhang K. et al. Synthesis of carboxyl cellulose sulfate with various contents of regioselectively introduced sulfate and carboxyl groups // Carbohydrate Polymers. 2010. Vol. 82. Issue 1. Pp. 92–99.

23. Пижурич А.А., Пижурич А.А. Основы научных исследований в деревообработке. М. : МГУЛ, 2005. 304 с. EDN QNJGPF.

24. Schweiger R.G. New cellulose sulfate derivatives and applications // Carbohydrate Research. 1979. Vol. 70. Issue 2. Pp. 185–198. DOI: 10.1016/S0008-6215(00)87099-8

25. Курзин А.В., Евдокимов А.Н., Трифонова А.Д., Курзина О.С. Получение сопряженных жирных кис-

лот таллового масла // Химия растительного сырья. 2011. № 2. С. 183–184. EDN OCQQYR.

26. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа : учебное пособие. СПб. : ИТМО, 2021. 152 с. EDN SXYAMM.

27. Дудочкина Е.А., Лямкин Д.И., Черкашин П.А., Жемерикин А.Н. Структурно-механические свойства высоконаполненных полиолефиновых композиций для кабельного заполнения // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. № 2 (142). С. 126–130. EDN RNJNON.

28. Скрозников С.В., Лямкин Д.И., Рудаков Г.Ф., Прокофьева И.А., Жемерикин А.Н., Кобец А.В. и др. Особенности эксплуатационных свойств кабельных изделий с полимерным заполнением // Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 3 (132). С. 34–37. EDN RCCFSZ.

29. Аскадский А.А. Количественный анализ влияния химического строения на физические свойства полимеров // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 1995. Т. 37. № 2. С. 332–357.

30. Notani M.A., Nejad F.M., Fini E.H., Hajikarimi P. Low-Temperature Performance of Toner-Modified Asphalt Binder // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2019. Vol. 145. Issue 3. P. 04019022. DOI: 10.1061/JPEODX.0000123

31. Sandrasagra J., Ma J., Hesp S.A.M. Understanding the field performance of asphalt binders in continental climates through modulated differential scanning calorimetry // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 391. P. 131857. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131857

32. Ding H., Hesp S.A.M. Another look at the use of modulated differential scanning calorimetry to study thermoreversible aging phenomena in asphalt binders // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 267. P. 121787. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121787

33. Фролов И.Н., Баширцева Н.Ю., Зиганшин М.А., Фирсин А.А. Особенности идентификации низкотемпературных термических эффектов на ДСК термограммах битумов // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. № 18. С. 58–61. EDN WYBRZZ.

34. Frolov I.N., Firsin A.A., Okhotnikova E.S., Yusupova T.N., Ziganshin M.A. The study of bitumen by differential scanning calorimetry: the interpretation of thermal effects // Petroleum Science and Technology. 2019. Vol. 37. No. 4. Pp. 417–424. DOI: 10.1080/10916466.2018.1550499. EDN CQYTWV.

Поступила в редакцию 11 июля 2024 г.

Принята в доработанном виде 19 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 27 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Юрьевич Небрatenko** — кандидат химических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов Института пути, строительства и сооружений; **Российский**

университет транспорта (РУТ (МИИТ)); 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; РИНЦ ID: 8398-9130, ResearcherID: ACW-3832-2022, ORCID: 0000-0002-3607-8876; nebratenko@mail.ru;

Александр Николаевич Жемерикин — кандидат технических наук, кафедра химии высокомолекулярных соединений; Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева); 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1; zhan170961@mail.ru;

Дмитрий Иванович Лямкин — кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии высокомолекулярных соединений; Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева); 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1; РИНЦ ID: 4083-9535; nat.liamkina@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dubina S.I., Kandrashin V.G. The quality of Russian highways. *Transport of the Russian Federation*. 2006; 2(2):48-50. EDN KDNKIZ. (rus.).
2. Erofeev V.T., Likomaskina M.A., Afonin V.V., Arkhipova A.I. A study on resistance of asphalt concrete exposed to the effect of mycelial fungi. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1358-1371. DOI: 10.22227/1997-0935. 2022.10.1358-1371. EDN SKBEFD. (rus.).
3. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:80-85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.80
4. Gokhman L.M. *Road polymerasfalt concrete*. Moscow, Ekon-Inform, 2017; 477. (rus.).
5. Chen M., Javilla B., Hong W., Pan C., Rirara M., Mo L. et al. Rheological and Interaction Analysis of Asphalt Binder, Mastic and Mortar. *Materials*. 2019; 12(1):128. DOI: 10.3390/ma12010128
6. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009; 145(1-2):42-82. DOI: 10.1016/j.cis.2008.08.011
7. Kolbanovskaya A.S., Mikhailov V.V. *Road bitumen*. Moscow, Transport, 1973; 261. (rus.).
8. Schaur A., Unterberger S., Lackner R. Impact of molecular structure of SBS on thermomechanical properties of polymer modified bitumen. *European Polymer Journal*. 2017; 96:256-265. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2017.09.017
9. Kök B.V., İrhan B., Yılmaz M., Yalçın E. Research on the rheological properties of bitumen modified with waste photopolymer. *Construction and Building Materials*. 2022; 346:128446. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128446
10. Safina I.R., Ibragimova D.A., Yakushev E.A., Ismiev R.R. Application of the SARA analysis method to characterize oil dispersed systems. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014; 17(24):212-213. EDN THHJPH. (rus.).
11. Adams J.J., Rovani J.F., Planche J.-P., Lovelidge J., Literati A., Shishkova I. et al. SAR-AD Method to Characterize Eight SARA Fractions in Various Vacuum Residues and Follow Their Transformations Occurring during Hydrocracking and Pyrolysis. *Processes*. 2023; 11(4):1220. DOI: 10.3390/pr11041220
12. Ivanova L.V., Burov E.A., Koshelev V.N. Asphaltene-resin-paraffin deposits in the processes of oil production, transportation and storage. *Oil and Gas Business*. 2011; 1:268-284. EDN OOVKYV. (rus.).
13. Abdrafikova I.M., Kayukova G.P., Vandyukova I.I., Morozov V.I., Gubaidullin A.T. Fractional composition of asphaltenes from natural bitumen of Permian deposits of Tatarstan. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2011; 3:180-186. EDN NDPLCP. (rus.).
14. Prokopovich S. Accounting system as part of forest resources national wealth: assessment and prospects. *Proceedings of BSTU. No. 7. Economics and Management*. 2011; 7:102-105. EDN SQTLLQ. (rus.).
15. Zhang R., Wang H., You Z., Jiang X., Yang X. Optimization of bio-asphalt using bio-oil and distilled water. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 165:281-289. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.154
16. Feraru G.S. The ecological-economic aspects of the waste generation and processing (on an example of a timber industry complex). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2010; 2(82):86-99. EDN MJBGVZ. (rus.).
17. Golovin A.I., Trofimov A.N., Uzov G.A. et al. *Forest chemical products of sulfate-cellulose production*. Moscow, Forestry industry, 1988; 288. (rus.).
18. Ismagilov R.M., Radbil' A.B., Radbil' B.A. Modification of tall pitch with paraformaldehyde. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2003; 2:59-64. EDN HYPXXR. (rus.).
19. Semenicheva L.L., Mavrina E.A., Il'ichev I. S., Shchepalov A.A. Analysis of the properties of tall pitch as a raw material for obtaining a binder pitch of the anode mass of electrolyzers for the production of aluminum. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2014; 4:229-233. EDN TQBWJ. (rus.).

20. Ismagilov R.M., Radbil' A.B., Radbil' B.A. Ways of qualified use of tall pitch. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2004; 2:73-76. EDN HYPYUJ. (rus.).
21. Chen G., Zhang B., Zhao J., Chen H. Improved process for the production of cellulose sulfate using sulfuric acid/ethanol solution. *Carbohydrate Polymers*. 2013; 95(1):332-337. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.03.003
22. Zhang K. et al. Synthesis of carboxyl cellulose sulfate with various contents of regioselectively introduced sulfate and carboxyl groups. *Carbohydrate Polymers*. 2010; 82(1):92-99.
23. Pyzhurin A.A., Pyzhurin A.A. *Fundamentals of scientific research in woodworking*. Moscow, MSUL, 2005; 304. EDN QNJGPF. (rus.).
24. Schweiger R.G. New cellulose sulfate derivatives and applications. *Carbohydrate Research*. 1979; 70(2):185-198. DOI: 10.1016/S0008-6215(00)87099-8
25. Kurzina A.V., Evdokimov A.N., Trifonova A.D., Kurzina O.S. Obtaining conjugated fatty acids of tall oil. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2011; 2:183-184. EDN OCQQYR. (rus.).
26. Sitnikova V.E., Ponomareva A.A., Uspenskaya M.V. *Methods of thermal analysis*. St. Petersburg, ITMO, 2021; 152. EDN SXYAMM. (rus.).
27. Dudochkina E.A., Lyamkin D.I., Cherkashin P.A., Jemerikin A.N. Structure-mechanical properties of higt filled polyolethen compauds for cable filling. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2013; 27(2):(142):126-130. EDN RNJNON. (rus.).
28. Skroznikov S.V., Lyamkin D.I., Rudakov G.F., Prokof'eva I.A., Zhemerikin A.N., Kobets AV. et al. Features of the operational properties of cable products with a polymer filler. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2012; 26(3):(132):34-37. EDN RCCFSZ. (rus.).
29. Askadskii A.A. Structure-Property Relationships in Polymers: Quantitative Analysis. *High-molecular compounds. Series B*. 1995; 37(2):332-357. (rus.).
30. Notani M.A., Nejad F.M., Fini E.H., Hajikarimi P. Low-Temperature Performance of Toner-Modified Asphalt Binder. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2019; 145(3):04019022. DOI: 10.1061/JPEODX.0000123
31. Sandrasagra J., Ma J., Hesp S.A.M. Understanding the field performance of asphalt binders in continental climates through modulated differential scanning calorimetry. *Construction and Building Materials*. 2023; 391:131857. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131857
32. Ding H., Hesp S.A.M. Another look at the use of modulated differential scanning calorimetry to study thermoreversible aging phenomena in asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2021; 267:121787. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121787
33. Frolov I.N., Bashkirtseva N.Yu., Ziganshin M.A., Firsin A.A. Features of identification of low-temperature thermal effects on DSC thermograms of bitumen. *Bulletin of the Technological University*. 2016; 19(18):58-61. EDN WYBRZZ. (rus.).
34. Frolov I.N., Firsin A.A., Okhotnikova E.S., Yusupova T.N., Ziganshin M.A. The study of bitumen by differential scanning calorimetry: the interpretation of thermal effects. *Petroleum Science and Technology*. 2019; 37(4):417-424. DOI: 10.1080/10916466.2018.1550499. EDN CQYTWV.

Received July 11, 2024.

Adopted in revised form on July 19, 2024.

Approved for publication on November 27, 2024.

BIONOTES: **Dmitry Yu. Nebratenko** — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Airfields, Foundations and Foundations of the Institute of Track, Construction and Structures; **Russian University of Transport (RUT (MIIT))**; build. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation; ID RSCI: 8398-9130, ResearcherID: ACW-3832-2022, ORCID: 0000-0002-3607-8876; nebratenko@mail.ru;

Alexander N. Zhemerikin — Candidate of Technical Sciences, Department of Chemistry of High Molecular Weight Compounds; **D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology**; build. 1, 9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; zhan170961@mail.ru;

Dmitry I. Lyamkin — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry of High Molecular Weight Compounds; **D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology**; build. 1, 9 Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; ID RSCI: 4083-9535; nat.liamkina@yandex.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Количественная оценка суффозионной устойчивости
доломитовой муки при карстологическом прогнозе

Михаил Михайлович Уткин¹, Татьяна Александровна Уткина²
¹ Гео Палитра; г. Нижний Новгород, Россия;
² Горный институт Уральского отделения Российской академии наук — филиал Пермского федерального
исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»);
г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В строительстве большое количество объектов возводится в условиях, когда в основании залегают разрушенные до состояния муки карбонатные породы. На конкретном объекте, возводимом в г. Казани, для доломитовой муки детально изложено планирование, подготовка и проведение лабораторного экспериментального испытания, заключающегося в количественной оценке суффозионной устойчивости муки.

Материалы и методы. Изучение суффозионной устойчивости доломитовой муки проводилось на специальном фильтрационно-суффозионном приборе. При планировании и подготовке эксперимента учитывались все основные факторы, влияющие на механическую и химическую суффозию. Для механической — физические и фильтрационные характеристики породы, ее напряженно-деформированное состояние, а также объем зоны-приемника для вынесенных фильтрационным потоком продуктов суффозии (мелких частиц); для химической — химический состав и состояние породы, химический состав и скорость движения воды.

Результаты. Доломитовая мука не подвержена процессу растворения, поэтому она отнесена к элювиальному грунту, а не к карстующейся породе. В части механической суффозионной устойчивости выполнено сравнение результатов аналитических решений и экспериментального испытания, согласно которым в первом случае мука является суффозионной, а во втором — практически несуффозионной (суффозия — неопасной).

Выводы. Площадка строительства отнесена к неопасной категории в карстовом и карстово-суффозионном отношении. При этом не исключена механическая суффозия, не связанная с карстом. Применительно к доломитовой муке рекомендовано вместо скорости растворения породы, регламентируемой действующими нормативными документами, использовать скорость протекания механической или в исключительных случаях комплексной (химико-механической) суффозии, под которой понимается скорость роста суффозионной осадки. В дальнейшем эту величину рекомендовано использовать при прогнозировании размеров суффозионных деформаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карст, карбонатный карст, доломитовая мука, скорость растворения карстующихся пород, механическая суффозия, химическая суффозия, оценка суффозионной устойчивости грунтов, скорость роста суффозионной осадки

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500052-9) «Процессы рудообразования и гипергенной трансформации эвапоритов Пермского Предуралья».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Уткин М.М., Уткина Т.А. Количественная оценка суффозионной устойчивости доломитовой муки при карстологическом прогнозе // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 84–94. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.84-94

Автор, ответственный за переписку: Михаил Михайлович Уткин, geokarst@mail.ru.

Quantitative assessment of dolomite powder suffusion resistance
in karstological prognosis

Mikhail M. Utkin¹, Tatyana A. Utkina²
¹ Geo Palitra; Nizhny Novgorod, Russian Federation;
² Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences is a branch of the Perm Federal
Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In construction, a large number of objects are erected in conditions where the foundation consists of carbonate rocks that are destroyed to the state of powder. The paper provides materials on the planning, preparation and conduct

of a laboratory experimental test for dolomite powder lying at the base of a building in the Kazan. The experiment is presented to quantify the suffusion resistance of powder.

Materials and methods. The study of the suffusion resistance of dolomite powder was carried out using a special filtration-suffusion device. When planning and preparing the experiment, all the main factors were simultaneously taken into account. For mechanical suffusion, these are the physical and filtration characteristics of the rock, its stress-strain state (SSS) and also the volume of the receiving zone for the suffusion products carried out by the filtration flow. For chemical suffusion these are the chemical composition and condition of the rock, the chemical composition and speed of water movement.

Results. It was established that dolomite powder is not subject to the dissolution process, therefore it is classified as eluvial soil and not as karst rock. In terms of mechanical suffusion stability, a comparison was made of the results of analytical solutions and experimental tests, according to which in the first case the dolomite powder is suffusion, and in the second — practically non-suffusion.

Conclusions. The construction site is classified as non-hazardous in terms of karst and karst-suffusion. At the same time, mechanical suffusion not related to karst cannot be excluded. When assessing the suffusion resistance of dolomite powder, it is recommended to use the rate of mechanical or complex (chemical-mechanical) suffusion instead of the rate of rock dissolution. In the future it is recommended to use the obtained value when predicting the size of suffusion deformations.

KEYWORDS: karst, carbonate karst, dolomite powder, dissolution rate of karst rocks, mechanical suffusion, chemical suffusion, assessment of soil's suffusion stability, growth rate of suffusion subsidence

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (reg. number R&D 124020500052-9) "Processes of ore formation and hypergene transformation of evaporites of the Perm Cis-Urals".

FOR CITATION: Utkin M.M., Utkina T.A. Quantitative assessment of dolomite powder suffusion resistance in karstological prognosis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):84-94. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.84-94 (rus.).

Corresponding author: Mikhail M. Utkin, geokarst@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое сегодня увеличение объемов строительства все чаще приводит к освоению территорий с высокими инженерно-геологическими рисками, к которым относятся и участки с развитием карстово-суффозионных процессов в карбонатных породах. Под воздействием физического, химического или смешанного выветривания происходит снижение прочности карбонатного массива, увеличение сжимаемости отложений, а также дезинтеграция исходных пород до обломков песчано-алевритоглинистой размерности с образованием известняковой и доломитовой муки. При ее наличии в основании капитальных сооружений рекомендуется производить качественную и количественную оценку суффозионной устойчивости, результаты которой напрямую влияют на выбор наиболее оптимальных проектных решений.

В инженерно-геологическом отношении доломиты (в том числе доломитовая мука), согласно действующим нормативным документам, могут быть отнесены как к карстующимся породам, подверженным процессу растворения¹, так и элювиальным грунтам, в которых основная роль принадлежит механической суффозии². Причем в первом случае не исклю-

чается проявление процессов суффозионного выноса под воздействием напорной фильтрации, а во втором — растворения. Таким образом, объективное отнесение доломитовой муки к карстующейся породе или элювиальному грунту может быть выполнено только после количественной оценки химической и механической суффозионной устойчивости.

Изучению карстово-суффозионных процессов в доломитовых массивах посвящено немало работ. Среди имеющихся публикаций отмечаются два основных направления: изучение закономерностей выветривания под воздействием различных факторов [1–4], учет влияния карстово-суффозионных процессов при проектировании и строительстве [5]. Исследований по количественной оценке карстовой опасности и суффозионной устойчивости существенно меньше [6, 7], однако разнообразие предлагаемых авторами методов говорит об отсутствии единого методологического подхода. Касаясь прогнозирования механической суффозии в РФ наибольшее распространение получили методики, изложенные в Рекомендациях ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева^{3, 4, 5} и основанные на учете физических и фильтрацион-

³ П 12–83 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. Л., 1983. 70 с.

⁴ П 49–90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. Л., 1991. 70 с.

⁵ П 56–90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. СПб., 1992. 108 с.

¹ СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М. : Госстрой России, 2003. 88 с.

² СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть III. Правила производства работ в районах распространения специфических грунтов. М. : Госстрой России, 2004. 71 с.

ных характеристик дисперсных несвязных и слабо-связных пород. Кроме того, для оценки суффозионной опасности предлагается использование моделирования на базе различных программных обеспечений и с помощью построения тематических карт [8–10]. В части карстовой опасности наиболее распространенной является методика И.А. Саваренского, приведенная в Рекомендациях ПНИИИС [11] и послужившая базой нормативного документа⁶. Методика основана на учете плотности поверхностных карстопоявлений и пораженности территории провалами при прогнозировании интенсивности провалообразования.

Ключевые положения по оценке карстовой опасности и мероприятия по противокарстовой защите достаточно подробно изложены в нормативных документах по инженерно-геологическим изысканиям¹

⁶ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. 2003.

и проектированию⁷, тогда как нормативной базы для оценки суффозионной опасности, не связанной с растворением, в настоящее время нет [12]. Однако общие черты рассматриваемых процессов позволяют, по нашему мнению, использовать при оценке механической суффозии некоторые положения нормативов по карсту^{1, 7}. Так, прогнозирование размеров ожидаемых карстовых деформаций в карбонатных массивах в основании сооружения или на дневной поверхности осуществляется исходя из вероятных размеров карстовой полости на момент окончания расчетного срока службы сооружения, для оценки которых применяется скорость раство-

⁷ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями № 1–4). М. : ФГБУ «РСТ», 2022. 370 с.; СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования. М. : Стандартинформ, 2021. 72 с.

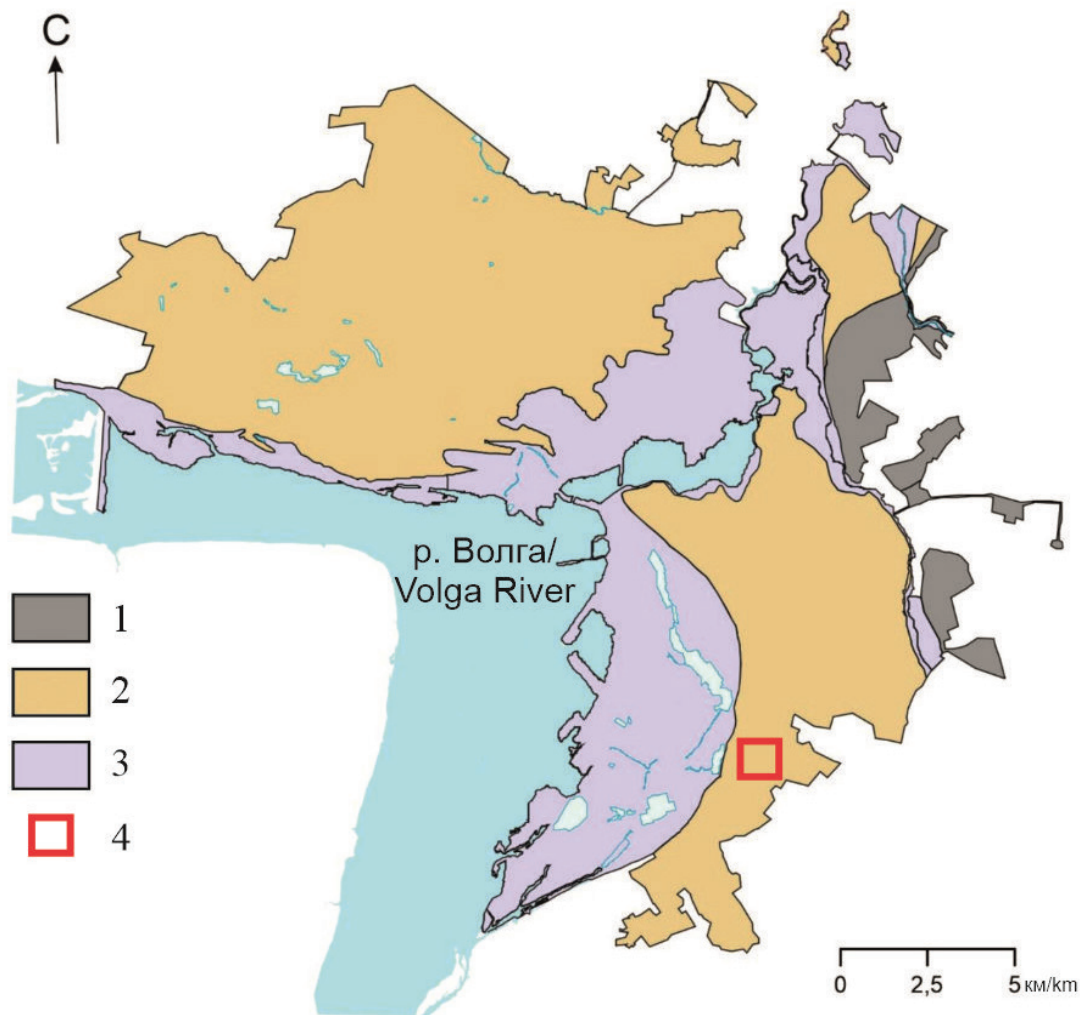


Рис. 1. Карта инженерно-геологических формаций г. Казани (по работе [14], с дополнениями): 1 — коренной берег; 2 — высокие террасы; 3 — низкие террасы; 4 — площадка исследования

Fig. 1. Map of engineering-and-geological formations of Kazan (by [14] with additions): 1 — main bank; 2 — high terraces; 3 — low terraces; 4 — research site

рения карстующихся пород⁷. Для доломитовой муки, которая может выноситься и по суффозионному механизму, предлагается вместо скорости растворения использовать скорость протекания механической или в исключительных случаях комплексной (химико-механической) суффозии, под которой понимается скорость возрастания суффозионной осадки. Ранее этот подход применялся нами при оценке карстовой опасности участка в условиях мелового карста [13].

Для исследования комплексной (химико-механической) суффозионной устойчивости доломитовой муки авторами были отобраны пробы карбонатов, залегающих в основании строящегося 17-этажного жилого дома в центральной части Приволжского района г. Казани.

В геоморфологическом отношении площадка относится к группе высоких террас — одиновско-московской, лихвинско-днепровской (рис. 1), для которых характерно господство денудации, линейной эрозии, склоновых процессов [14], появление суффозионных просадочных западин⁸, а также образование в настоящее время карбонатного элювия [15].

В строении площадки (до глубины проявления возможных карстово-суффозионных процессов) принимают участие отложения сакмарского яруса нижней перми (P_1s), представленные переслаивающимися загипсованными доломитами и гипсами с редкими прослоями песчаников и алевролитов (общая мощность до 80,0–115,0 м). Перекрывающие их казанские (P_2kz) карбонатные породы (мергели, известковистые доломиты и доломитизированные известняки общей мощностью до 60,0 м) характеризуются повышенной трещиноватостью, часто разрушены до дисперсного состояния и нередко представляют собой крайне неоднородные доломитовые суглинки с различной долей гравия и щебня, а также высокой долей (57–99 %) доломитового материала в тонких фракциях [16]. Выше залегают уржумские (P_2ur) отложения (20,0–22,0 м), сложенные чередующимися прослоями глины и суглинков, и неоген-четвертичные пески различной крупности (до 44,0 м) с прослоями супесей и суглинков.

В гидрогеологическом отношении в верхней части разреза выделяется единый гидрогеологический комплекс [17], объединяющий водоносные (и локально водоносные) горизонты четвертичных, плиоценовых, уржумских и казанских отложений: воды безнапорные, преимущественно гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,48–0,58 г/дм³.

⁸ Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Средневолжская серия. Лист N-39-II (Казань). Карта четвертичных образований / сост. ФГУП «Волгагеология»; авт. М.А. Соловьева и др., ред. В.П. Кириков. М. : ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования скорости растворения карстующихся пород, обладающих жесткими структурными связями, существует ряд «классических» методов: обтекание растворителем прямых четырехугольных призм пород [18], прохождение растворителя через отверстие в породах [19, 20]⁹ и др. Однако для экспериментов с доломитовой мукой они не подходят: отсутствие жестких структурных связей у муки приведет к тому, что под действием растворителя испытуемый образец потеряет свою форму, а пылеватые частицы будут беспрепятственно выноситься потоком растворителя, что в конечном счете приведет к сильно завышенной оценке опасности.

С целью получения достоверных результатов комплексной устойчивости доломитовой муки в процессе эксперимента должны соблюдаться все основные факторы, влияющие на скорость протекания внутренней механической и химической суффозии. Для первой (механической)^{3, 4, 5} — это физические и фильтрационные характеристики породы (гранулометрический состав пород и их пористость, скорость движения воды в порах пород), ее напряженно-деформированное состояние (НДС), а также объем зоны-приемника для вынесенных фильтрационным потоком продуктов суффозии (мелких частиц). Для второй (химической) [18–20] — химический состав и состояние пород, химический состав и скорость движения вод.

Исследования физических характеристик карбонатных пород (определение гранулометрического состава и пористости) и химического состава подземных вод проводились в аккредитованной испытательной лаборатории АО «Гео Палитра». Минеральный и химический состав доломитовой муки изучался в Горном институте УрО РАН при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 (оператор Е.П. Чиркова). Сканирование образца происходило на площади 5 × 5 мм.

При лабораторном физическом моделировании гидрогеологических условий среды в качестве растворителя использовалась вода, отобранная из казанского терригенно-карбонатного комплекса в процессе проходки глубокой инженерно-геологической скважины. Кроме того, учитывались два основных параметра, влияющие на фильтрацию: расчетный поперечник поровых каналов d_0 (принят равным диаметру максимального фильтрационного хода $d_0^{\max}$) и скорость движения воды. Первый параметр обычно определяется двумя расчетными способами, а именно, в первом способе учитываются главным образом гранулометрический состав и пористость породы, во втором — ее

⁹ Рекомендации по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов / ПНИИИС Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1984. 48 с.

ламинарный коэффициент фильтрации и пористость, а также форма и шероховатость фракций^{3,5}. Для моделирования в эксперименте полученной величины d_0^{max} на испытуемый образец снизу и сверху предложено приложить тканые сетки с необходимым размером ячейки, что позволит предотвратить беспрепятственный вынос суффозионных частиц из образца.

Для моделирования скорости движения воды в порах предусмотрена подача в прибор растворителя (воды) под давлением, которое соответствует напору вод в природном массиве (в нашем случае — в толще казанских терригенно-карбонатных пород). Предполагается, что такой подход является более корректным, нежели использование коэффициента фильтрации, определенного для всей карбонатной толщи.

Моделирование природного НДС испытуемого образца предложено осуществить посредством его нагружения статической сжимающей нагрузкой (в соответствии с положениями ГОСТ 12248.4–2020¹⁰) до давления, получаемого от собственного веса вышележащей толщи пород (бытовое давление).

Таким образом, при подготовке эксперимента были учтены все основные факторы, влияющие как на механическую, так и химическую суффозию доломитовой муки.

Подготовка эксперимента

Минералого-петрографическое изучение образцов доломитовой муки показало, что они пред-

ставляют собой агрегат футляровидных ромбоэдров доломита размером 10–15 мкм, интерстиции между которыми заполнены пелитоморфным глинисто-карбонатным материалом (рис. 2, табл. 1). Пересчет на нормативный состав последнего показал, что на долю глинистых минералов приходится в среднем 49,11 %, доломита — 30,70 %, кальцита — 19,99 %, гипса (безводный состав) — 0,20 %.

Исследование гранулометрического состава доломитовой муки показало ее повышенную неоднородность (степень неоднородности, коэффициент неоднородности или разнотерности $C_u = \eta_x = k_{60,10} = 9,7$): на долю фракции 1–0,5 мм приходится 6,30 % частиц; 0,5–0,25 мм — 4,20 %; 0,25–0,10 мм — 3,10 %; 0,10–0,05 мм — 6,90 %; 0,05–0,01 мм — 58,40 %; 0,01–0,002 мм — 14,30 %; менее 0,002 мм — 6,80 %. Согласно ГОСТ 25100¹¹ доломитовая мука может быть классифицирована как суглинок. Коэффициент пористости составил 0,672.

Полученные физические характеристики доломитовой муки позволили вычислить по нескольким методикам^{3,5} диаметр максимального фильтрационного хода d_0^{max} , наибольшее значение которого составило 0,022 мм. Стоит отметить, что полученный показатель d_0^{max} дает возможность классифицировать изучаемую муку как суффозионную с коэффициентами суффозионности 3,6 и 4,4. Для учета при моделировании значения диаметра d_0^{max} было принято решение использовать в эксперименте тканную сетку с размером ячейки 0,03 мм (выбор данной сетки обу-

¹⁰ ГОСТ 12248.4–2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. М. : Стандартинформ, 2020. 19 с.

¹¹ ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. М. : Стандартинформ, 2020. 41 с.

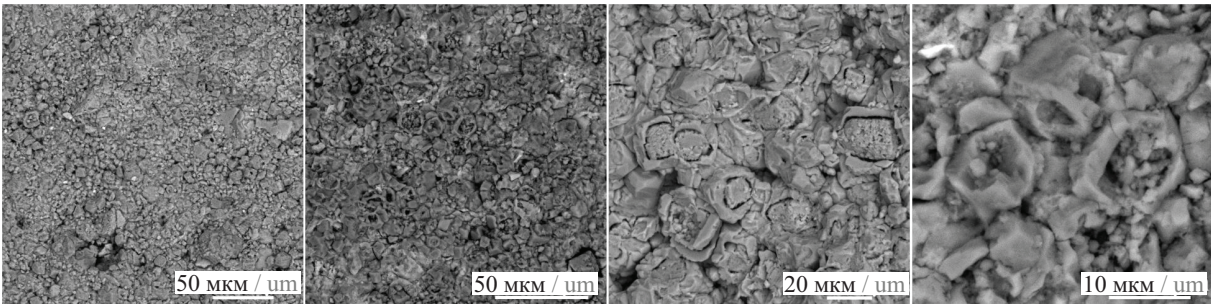


Рис. 2. Доломитовая мука, сложенная футляровидными ромбоэдрами доломита с глинисто-карбонатным заполнителем в интерстициях

Fig. 2. Dolomite powder, composed of dolomite case-shaped rhombohedrons with clay-and-carbonate aggregate in interstices

Табл. 1. Химический состав глинисто-карбонатного заполнителя (n = 65), мас. %

Table 1. Chemical composition of clay-and-carbonate aggregate (n = 65), wt. %

Значение / Value	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Минимум Minimum	0	0	0,73	5,75	0	0	0	0,39	0
Максимум Maximum	1,29	37,99	16,68	98,87	3,40	74,98	0,97	40,82	1,18
Среднее Average	0,46	14,03	9,11	35,27	1,61	30,33	0,23	8,97	0,12



Рис. 3. Испытуемый образец доломитовой муки в режущем кольце

Fig. 3. Test specimen of dolomite powder in the cutting ring

словлен и тем, что материалы с меньшим параметром ячейки в широкой продаже отсутствуют).

На стадии пробоподготовки в монолит доломитовой муки равномерно вдавливалось режущее кольцо (внутренний диаметр и высота — 8 см) (рис. 3). После этого кольцо с отобранным материалом высушивалось для определения (согласно указаниям ГОСТ 5180¹²) первоначальной массы образца в сухом состоянии. Затем на испытуемый образец с обеих сторон прикладывалась тканная сетка, которая снизу фиксировалась перфорированной опорной пластиной, а сверху — перфорированным штампом со штоком. Собранная конструкция помещалась в рабочее кольцо специального фильтрационно-суффозионного прибора, общий вид которого показан на рис. 4. Проектирование и изготовление прибора выполнено М. М. и М.В. Уткиными.

Далее осуществлялось увлажнение испытуемого образца до природной влажности ($W = 20,1\%$), полученной в ходе инженерно-геологических изысканий: для этого в рабочее кольцо прибора было вылито 165,5 г растворителя. Чтобы избежать проявления пневмокольматажа (закупорки пор породы воздухом, который может выделяться из протекающей через образец воды) в образце при увлажнении и последующем испытании использовался растворитель ком-

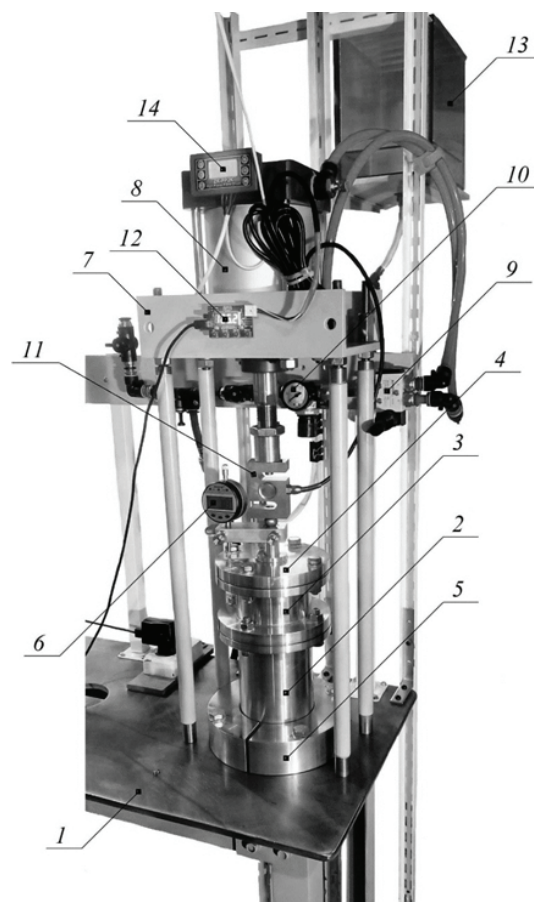


Рис. 4. Общий вид фильтрационно-суффозионного прибора: 1 — основание; 2 — рабочее кольцо, в которое устанавливается режущее кольцо с испытуемым образцом; 3 — дополнительное кольцо; 4 — центрирующее кольцо; 5 — прижимные полукольца; 6 — индикатор часового типа; 7 — упорная рама с ребрами жесткости; 8 — пневматический цилиндр; 9 — переключатель подачи/стравливания давления; 10 — регулятор давления; 11 — датчик силы; 12 — плата вычисления и вывода значения силы; 13 — емкость с растворителем; 14 — регулятор давления растворителя, которое создается специальным насосом и контролируется манометром (расположены с задней стороны прибора)

Fig. 4. General view of the filtration-and-suffusion device: 1 — base; 2 — working ring into which the cutting ring with the test specimen is installed; 3 — additional ring; 4 — centering ring; 5 — clamping half-rings; 6 — dial indicator; 7 — thrust frame with stiffening ribs; 8 — pneumatic cylinder; 9 — pressure supply/bleed switch; 10 — pressure regulator; 11 — force sensor; 12 — board for calculating and outputting the force value; 13 — container with solvent; 14 — solvent pressure regulator, which is created by a special pump and controlled by a pressure gauge (located on the back of the device)

натной температуры, отстоявшийся в напорном баке намного дольше рекомендуемых одних-двух суток^{3,4}.

Через 26 ч после увлажнения образца на рабочее кольцо прибора устанавливалось дополнительное кольцо вместе с центрирующим, а на вертикальный шток — балка для крепления индикатора часового

¹² ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М. : Стандартинформ, 2016. 23 с.

типа. После осевого центрирования рабочего кольца оно прижималось к поверхности основания соответствующими полукольцами.

Ступенчатое нагружение испытуемого образца статической сжимающей нагрузкой выполнялось до давления, соответствующего бытовому (1,33 МПа = 13,5 кг/см²). Все ступени нагрузки прикладывались равномерно, без ударов. Количество ступеней и значения давления на них, а также время условной стабилизации деформации образца принимались в соответствии с ГОСТ 12248¹⁰. В течение двух дней нагружения из образца вытекло 38,1 г растворителя. В конце последней ступени нагружения вертикальная деформация (осадка) образца составила 3,76 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Непосредственное проведение эксперимента отсчитывалось с момента подачи растворителя в рабочую камеру прибора. Растворитель подавался под давлением, которое создавалось насосом и из-

мерялось манометром. Однако практически сразу выяснилось, что фактическое давление значительно меньше проектного (3 кг/см²), в связи с чем было принято решение включить в работу второй насос, расположенный после испытуемого образца. Тем самым внизу образца создавался вакуум, который измерялся вакуумметром.

В целом вышеизложенный подход не привел к искажению общей картины фильтрационно-суффозионных закономерностей и позволил достичь на 8-й день суммарного давления 2,4 кг/см². Примечательно, что избыточное давление практически полностью стабилизировалось на 5-й день эксперимента, а вакуум — только на 11-й день (рис. 5). За критерий условной стабилизации принято отсутствие динамики роста давления.

На всем протяжении экспериментального испытания, длившегося 76 дней, измерялась осадка образца (рис. 6), которая к концу опыта составила 4,08 мм.

В начале, середине и конце эксперимента на стандартный химический анализ (результаты приведены

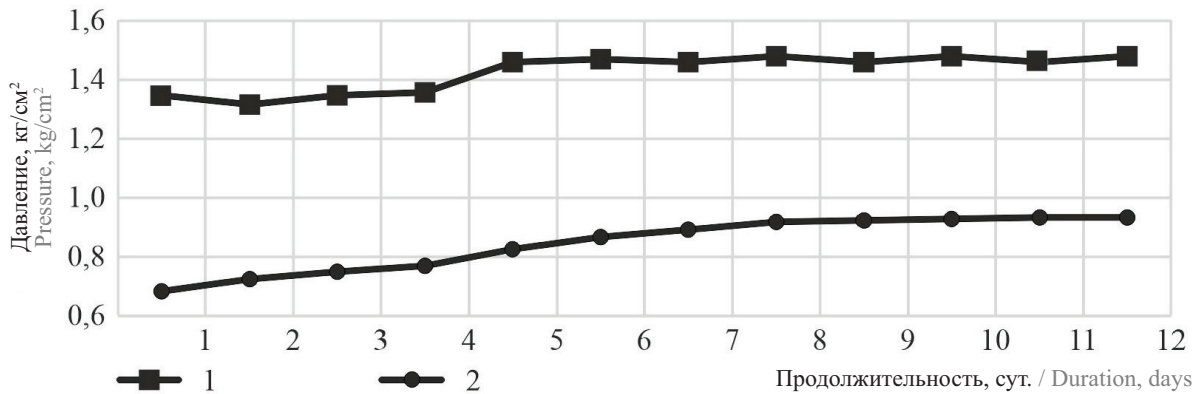


Рис. 5. Изменение избыточного давления (1) и вакуума (2) в фильтрационно-суффозионном приборе

Fig. 5. Changes in excess pressure (1) and vacuum (2) in the filtration-and-suffusion device

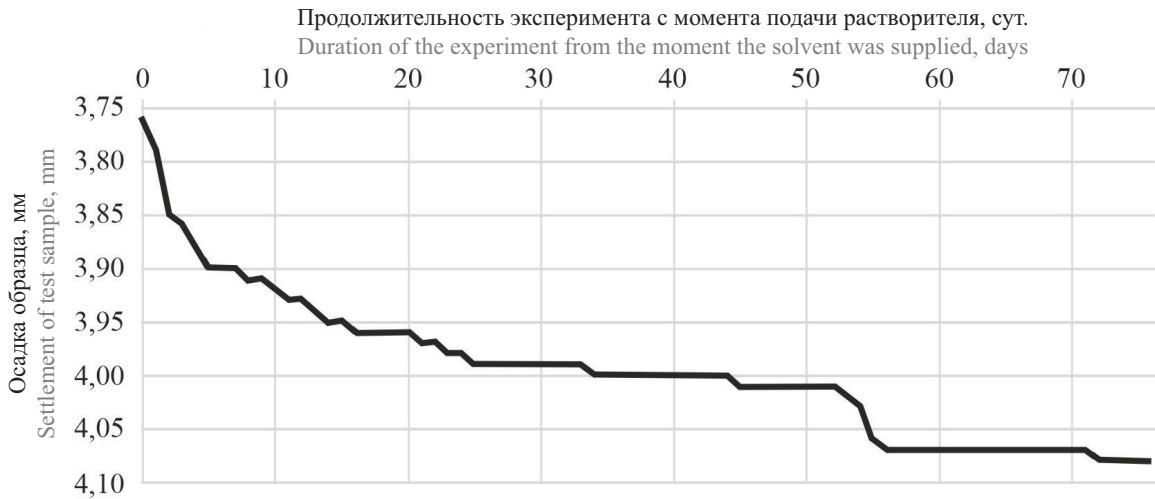


Рис. 6. Изменение осадки испытуемого образца во времени

Fig. 6. Change in the settlement of the test specimen over time

Табл. 2. Результаты стандартных химических анализов растворителя

Table 2. Standard chemical analyzes results of solvent

Номер анализа Analysis number	Условие отбора растворителя Solvent selection condition	Анионы, мг/дм ³ Anions, mg/dm ³			Катионы, мг/дм ³ Cations, mg/dm ³			pH	M, г/дм ³ M, g/dm ³
		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺		
В начале-середине эксперимента At the beginning and middle of the experiment									
1	До прохождения образца Before passing the specimen	317,0	55,83	60,20	91,78	33,29	18,86	7,9	0,480
2	После прохождения образца After passing the specimen	161,7	64,70	73,02	62,12	18,47	31,74	8,1	0,324
В середине-конце эксперимента At the middle to the end of the experiment									
3	До прохождения образца Before passing the specimen	260,9	54,10	38,20	80,16	32,81	0,23	7,7	0,478
4	После прохождения образца After passing the specimen	204,4	58,50	34,80	68,14	27,94	0,46	7,9	0,412

в табл. 2) отбирались пробы растворителя объемом 1,5 л до и после его прохождения через испытуемый образец. За все время опыта через образец в общей сложности протекло 5,66 л растворителя.

После завершения эксперимента, регистрируемого с момента отключения насосов, испытуемый образец сначала оперативно взвешивался в водонасыщенном состоянии, а после дальнейшего высушивания — в сухом.

В ходе проведения эксперимента расход растворителя, протекающего через испытуемый образец, не являлся постоянным. Так, в начале опыта его значение достигало 0,147 л/сут, а в конце — 0,045 л/сут (среднесуточный расход для всего периода составил 0,074 л/сут). На основании этого, а также учитывая площадь поперечного сечения образца (50,27 см²), средняя скорость движения растворителя, равная коэффициенту фильтрации, составила 0,015 м/сут. Данное значение на несколько порядков меньше полученного в результате полевых опытно-фильтрационных работ (ОФР) — 2,2 м/сут, что, вероятно, связано с особенностями строения карбонатной толщи: на отдельных глубинах отмечались маломощные (до 2,5 м) прослои трещиноватых карбонатов, к которым и приурочены подземные воды.

Произведенный ранее аналитический расчет диаметра максимального фильтрационного хода $d_0^{\max}$ позволил классифицировать изучаемую муку как суффозионную с коэффициентами суффозионности 3,6 и 4,4. Дополнительно была посчитана критическая скорость фильтрации (v_{cr})⁵, при которой наступает механическая суффозия испытуемого образца. При плотности частиц муки $\rho_s = 2,71$ г/см³ и коэффициенте ее фильтрации $k_f = 2,2$ м/сут величина v_{cr} составила 1,1 м/сут, что в несколько раз меньше k_f , полученного при полевых ОФР. Это соотношение сохраняется и при использовании в расчетах $k_f = 0,015$ м/сут, полученного экспериментально. Следовательно, мука является суффозионно-неустойчивой.

Согласно гидрохимическим расчетам по методике В.П. Зверева [11], растворитель (воды казанской карбонатной толщи) характеризуется агрессивностью к доломитам (произведение активности ($aCa^{2+} \cdot aMg^{2+} \cdot aCO_3^{2-}$) равно $4,76 \cdot 10^{-18}$ и $2,05 \cdot 10^{-17}$, а произведение растворимости — $2,0 \cdot 10^{-15}$). Однако результаты взвешивания испытуемого образца в сухом состоянии показали увеличение массы испытуемого образца после эксперимента на 0,57 г, что позволяет говорить, что в процессе фильтрации доломитовая мука сорбирует часть растворенных элементов из растворителя. Данное предположение подтверждается также уменьшением минерализации растворителя после прохождения образца (в начале-середине эксперимента снижалась на 0,156 мг/дм³, а в середине-конце — на 0,066 мг/дм³; среднее уменьшение минерализации составило 0,111 мг/дм³). Анализ химического состава вод показал, что после прохождения доломитовой муки в растворителе увеличилось содержание таких компонентов, как Na⁺ + K⁺ (на 68,29 % в начале-середине эксперимента и 100 % в середине-конце), Cl⁻ (15,89 и 8,13 % соответственно) и SO₄²⁻ (на 21,30 % увеличилось в первом случае и на 8,91 % уменьшилось во втором), и уменьшилось — Ca²⁺ (32,32 и 15,00 %), Mg²⁺ (44,52 и 14,84 %) и HCO₃⁻ (48,99 и 21,66 %). Полученные данные свидетельствуют, что при фильтрации выносятся только акцессорные элементы (Na⁺ + K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻), связанные преимущественно с глинистым материалом, тогда как основные породообразующие Ca²⁺, Mg²⁺ и HCO₃⁻ сорбируются мукой. Полученные выводы подтверждаются и особенностями строения доломитовой муки: тонкодисперсное состояние делает ее реакционноспособной к фильтрующимся подземным водам, за счет чего происходит сорбция растворенных Ca²⁺, Mg²⁺ и HCO₃⁻ и регенерация карбонатных частиц с образованием футляровидных кристаллов доломита.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют отнести изученную нами доломи-

товую муку к элювиальным грунтам с отсутствием карстовой и карстово-суффозионной опасности^{1, 7} и включить в состав покровной толщи. Пылевато-глинистое строение и низкий коэффициент фильтрации свидетельствуют о флюидоупорных свойствах муки. Вероятно, полученное различие теоретических и экспериментальных результатов по оценке суффозионной устойчивости может быть связано с многогранностью процесса суффозии, что вызывает сложность при учете всех факторов в рамках аналитических методик.

За время проведения экспериментального испытания приращение осадки испытуемого образца составило 0,32 мм из-за его уплотнения в верхней части за счет переноса в нижнюю часть мелких частиц, что, в свою очередь, говорит о зависимости осадки от суффозии. Данное положение позволяет при выполнении оценки суффозионной опасности изучаемой площадки рекомендовать вместо скорости растворения использовать скорость комплексного суффозионного процесса (в данном случае — механической суффозии), под которой понимается скорость роста суффозионной осадки. Согласно результатам эксперимента, ее значение не превысит 0,15 см/год. Впоследствии данную величину рекомендуется учитывать при прогнозировании размеров суффозионных деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенного экспериментального испытания представляется возможным сделать следующие практические выводы.

В рассмотренном случае исследуемая доломитовая мука отнесена к элювиальному грунту, нежели к карстующейся породе, так как мука не подвержена процессу растворения. Следовательно, площадка строительства является неопасной в карстовом и карстово-суффозионном отношении.

В части механической суффозионной устойчивости исследуемая доломитовая мука оказалась практически несуффозионной (хотя по аналитическим расчетам она получалась, наоборот, суффозионной), а суффозия неопасной. Сделанный вывод справедлив лишь при неизменности гидрогеологических условий как на площадке строительства, так и на прилегающей к ней территории, в связи с чем при строительстве и эксплуатации проектируемого здания данному обстоятельству должно уделяться повышенное внимание.

При выполнении оценки опасности площадок (участков) применительно к доломитовой муке рекомендуется вместо скорости растворения породы, регламентируемой СП 22.13330.2016, СП 499.1325800.2021, использовать скорость протекания механической или в исключительных случаях комплексной (химико-механической) суффозии, под которой понимается скорость роста суффозионной осадки.

Проведение экспериментальных испытаний доломитовой муки в фильтрационно-суффозионных приборах позволяет более объективно выполнить оценку суффозионной устойчивости муки и, следовательно, оценку суффозионной и карстово-суффозионной опасности территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bischoff J.L., Julia R., Shanks W.C., Rosenbauer R.J. Karstification without carbonic acid: Bedrock dissolution by gypsum-driven dedolomitization // *Geology*. 1994. Vol. 22. Issue 11. P. 995. DOI: 10.1130/0091-7613(1994)022<0995:kwcabd>2.3.co;2
2. Drever J.I., Stillings L.L. The role of organic acids in mineral weathering // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1997. Vol. 120. Pp. 167–181. DOI: 10.1016/s0927-7757(96)03720-x
3. Gabet E.J., Edelman R., Langner H. Hydrological controls on chemical weathering rates at the soil-bedrock interface // *Geology*. 2006. Vol. 34. Issue 12. P. 1065. DOI: 10.1130/G23085A.1
4. Dong X., Cohen M., Martin J.B., McLaughlin D.L., Murray A.B., Ward N.D. et al. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape // *Chemical Geology*. 2019. Vol. 527. P. 118774. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.05.021
5. Gao J., Chen G., Wang Z., Li L., Mitani Y., Li C. et al. Numerical modeling of the failure process of the heterogeneous karst rock mass using the DDA–SPH method // *Underground Space*. 2023. Vol. 13. Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.02.015
6. Jin W., Qiu Z., Zhang D. Experimental study on the influence evaluation of deep alluvium foundation suffusion on soil skeleton deformation in Luding Hydropower Station foundation // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2023. Pp. 2–11.
7. Zhang X., Benamar A., Oueidat M., Luo Y. Experimental study on suffusion and contact erosion in double-layered alluvial foundation with a cut-off wall // *Acta Geotechnica*. 2023. Vol. 18. Issue 11. Pp. 6077–6095. DOI: 10.1007/s11440-023-02033-w
8. Latypov A., Zharkova N., Ter-Martirosyan A. Calculation of the stress-strain state of soil massifs with karst-suffusion cavities // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 042058. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042058
9. Строчкова Л.А., Леонова А.В. Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. № 5. С. 49–59. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3185. EDN CVPEGR.
10. Латыпов А.И., Гараева А.Н., Лунева О.В. Характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеев-

ской возвышенности // Грунтоведение. 2022. № 1 (18). С. 31–42. DOI: 10.53278/2306-9139-2022-1-18-31-42. EDN PTKQCD.

11. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М. : ПНИИИС, 1995. 167 с.

12. Хоменко В.П. Противокарстовая и противо-суффозионная защита в России: история и современность // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 482–489. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.482-489. EDN XOUNHF.

13. Уткин М.М., Уткин М.В. Оценка суффозионной устойчивости меловых пород при их водонасыщении атмосферными осадками // Гидрогеология и карстование : межвузов. сб. науч. тр. 2023. С. 119–128. EDN AIDIIZ.

14. Жаркова Н.И. Закономерности формирования инженерно-геологических условий г. Казани : дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2006. 197 с.

15. Болюховская Н.С. Эволюция лессово-почвенной формации Северной Евразии. М. : Изд-во Московского университета, 1995. 270 с.

16. Муравьев Ф.А., Жаркова Н.И., Латыпов А.И. Карбонатный элювий на территории г. Казани // Инженерная геология. 2013. № 4. С. 34–42. EDN RMUAUZ.

17. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия города Казани / науч. ред. Шевелев А.А. Казань : Изд-во Казанского университета, 2012. 236 с.

18. Родионов Н.В. Инженерно-геологические исследования в карстовых районах при устройстве малых водоемов, гражданском и промышленном строительстве : методические указания. М. : Госгеолтехиздат, 1958. 183 с.

19. Науменко В.Г. Лабораторные исследования выщелачиваемости гипса // Научные труды Ленинградского инженерно-строительного института. Вып. 18. Вопросы механики грунтов. 1954. С. 143–158.

20. Уткин М.М., Уткин М.В. Практический опыт определения скорости растворения карстующихся пород в лабораторных условиях на одном из этапов скоростной автомобильной дороги «Казань – Екатеринбург» // Спелеология и спелестология. 2023. № 2. С. 83–88. EDN UOTOKI.

Поступила в редакцию 28 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 28 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Михайлович Уткин** — кандидат технических наук, главный специалист карстологических исследований; **Гео Палитра**; 603000, г. Нижний Новгород, ул. Костина, д. 3, пом. П 53; РИНЦ ID: 857594; ResearcherID: KM-4828-2024; ORCID: 0009-0004-2833-8983; geokarst@mail.ru;

Татьяна Александровна Уткина — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых; **Горный институт Уральского отделения Российской академии наук — филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»)**; 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78А; РИНЦ ID: 40720; Scopus: 36641978900; ResearcherID: JBB-2684-2023; ORCID: 0009-0007-1700-850X; tatyanaak89@mail.ru.

Вклад авторов:

Уткин М.М. — концепция исследования, проведение эксперимента, обработка материалов, написание статьи.

Уткина Т.А. — научное редактирование текста, обработка материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bischoff J.L., Julia R., Shanks W.C., Rosenbauer R.J. Karstification without carbonic acid: Bedrock dissolution by gypsum-driven dedolomitization. *Geology*. 1994; 22(11):995. DOI: 10.1130/0091-7613(1994)022<0995:kwcabd>2.3.co;2

2. Drever J.I., Stillings L.L. The role of organic acids in mineral weathering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1997; 120:167–181. DOI: 10.1016/S0927-7757(96)03720-X

3. Gabet E.J., Edelman R., Langner H. Hydrological controls on chemical weathering rates at the soil-bedrock interface. *Geology*. 2006; 34(12):1065. DOI: 10.1130/G23085A.1

4. Dong X., Cohen M., Martin J.B., McLaughlin D.L., Murray A.B., Ward N.D. et al. Ecohydrologic

processes and soil thickness feedbacks control limestone weathering rates in a karst Landscape. *Chemical Geology*. 2019; 527:118774. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.05.021

5. Gao J., Chen G., Wang Z., Li L., Mitani Y., Li C. et al. Numerical modeling of the failure process of the heterogeneous karst rock mass using the DDA–SPH method. *Underground Space*. 2023; 13:1–22. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.02.015

6. Jin W., Qiu Z., Zhang D. Experimental study on the influence evaluation of deep alluvium foundation suffusion on soil skeleton deformation in Luding Hydro-power Station foundation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2023; 2–11.

7. Zhang X., Benamar A., Oueidat M., Luo Y. Experimental study on suffusion and contact erosion in double-layered alluvial foundation with a cut-off wall. *Acta Geotechnica*. 2023; 18(11):6077-6095. DOI: 10.1007/s11440-023-02033-w

8. Latypov A., Zharkova N., Ter-Martirosyan A. Calculation of the stress-strain state of soil massifs with karst-suffusion cavities. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 365:042058. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042058

9. Strokova L.A., Leonova A.V. Assessment of suffusion hazard on the territory of Tomsk. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2021; 332(5):49-59. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3185. EDN CVPEGR. (rus.).

10. Latypov A.I., Garaeva A.N., Luneva O.V. Characteristics of the suffusion hazard of the territory of the Bugulma plateau of the Bugulma-Belebey upland. *Gruntovedenie*. 2022; 1(18):3-42. DOI: 10.53278/2306-9139-2022-1-18-31-42. EDN PTKQCD. (rus.).

11. Savarensky I.A., Mironov N.A. *Guide to engineering-geological surveys in areas of karst development*. Moscow, PNIIS, 1995; 167. (rus.).

12. Khomenko V.P. Antikarst and antisuffusion protection in Russia: history and present situation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(4):482-489. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.482-489. EDN XOUHHF. (rus.).

13. Utkin M.M., Utkin M.V. Assessment of suffusion stability of chalky rocks when their water saturation

with atmospheric precipitation. *Hydrogeology and Karstology : interuniversity collection of scientific papers*. 2023; 119-128. EDN AIDIIZ. (rus.).

14. Zharkova N.I. *Patterns of formation of engineering-geological conditions of the city of Kazan : PhD thesis*. Ekaterinburg, 2006; 197. (rus.).

15. Bolikhovskaya N.S. *Evolution of the loess-soil formation of Northern Eurasia*. Moscow, Moscow University Publishing House, 1995; 270. (rus.).

16. Muravyov F.A., Zharkova N.I., Latypov A.I. Carbonate eluvium on the territory of Kazan. *Engineering Geology*. 2013; 4:34-42. EDN RMUAUZ. (rus.).

17. *Hydrogeological and engineering-geological conditions of the city of Kazan / scientific. ed. Shevchuk A.A.* Kazan, Kazan University Publishing House, 2012; 236. (rus.).

18. Rodionov N.V. *Engineering-geological research in karst areas during the construction of small reservoirs, civil and industrial construction : methodological instructions*. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1958; 183. (rus.).

19. Naumenko V.G. Laboratory studies of gypsum leachability. *Scientific works of the Leningrad Engineering and Construction Institute. Vol. 18. Issues of soil mechanics*. 1954; 143-158. (rus.).

20. Utkin M.M., Utkin M.V. Practical experience of determining the dissolution rate of karst rocks in laboratory conditions at one of the sections of "Kazan – Ekaterinburg" high-speed highway. *Speleology and Speleology*. 2023; 2:83-88. EDN UOTOKI. (rus.).

Received May 28, 2024.

Adopted in revised form on November 28, 2024.

Approved for publication on November 28, 2024.

B I O N O T E S : **Mikhail M. Utkin** — Candidate of Technical Science; chief specialist of karstological research; **Geo Palitra**; P 53 room, 3 Kostina st., Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation; ID RSCI: 857594; ResearcherID: KM-4828-2024; ORCID: 0009-0004-2833-8983; geokarst@mail.ru;

Tatyana A. Utkina — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher at the Laboratory of Geology of Mineral Deposits; **Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences is a branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences**; 78A Sibirskaia st., Perm, 614007, Russian Federation; ID RSCI: 40720; Scopus: 36641978900; ResearcherID: JBB-2684-2023; ORCID: 0009-0007-1700-850X; tatyanaak89@mail.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail M. Utkin — concept of research, article writing, research, illustrations.

Tatyana A. Utkina — scientific text editing, research, illustrations.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.22:627.231.037:627.52

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.95-107

Нормативные методы и численное моделирование при определении параметров расчетных волн для портовых гидротехнических сооружений

Измаил Григорьевич Кантаржи¹, Александр Григорьевич Гогин²,
Жанна Ивановна Нагорнова¹

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

² Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Указывается важность использования композитного моделирования при проектировании волновых нагрузок и воздействий на портовые гидротехнические сооружения, а именно определения параметров расчетных волн. В нормативных документах, предназначенных для вычисления допустимых значений элементов волн для безопасного обслуживания судов у причала, отмечаются некоторые недостатки, часть из которых описывается в данной статье.

Материалы и методы. В качестве примеров рассматриваются два объекта: Западный транспортно-логистический узел, проектируемый в Кольском заливе Баренцева моря (где для численного моделирования применялись модель расчета ветровых волн SWAN и модель течений и уровней воды COASTOX-CUR, вычисления аналитическим методом осуществлены по СП 38.13330.2018), и Многофункциональный грузовой район, расположенный в заливе Терпения Охотского моря (вычисления выполнялись в модели ветровых волн SWAN и длинноволновой модели SWASH). Для первого случая использовались значения волн в контрольных точках. Во втором примере — две расчетные модели для определения влияния судна на волновое поле: численная и аналитическая.

Результаты. Для первого примера выполнен анализ различий значений параметров волн с отражением и без аналитическим методом. Для второго представлены результаты моделирования — изополя значительных высот волн для стенки с судном и без него, с таблицей значений параметров волн в контрольных точках. Моделирование судна в причальном кармане показано через картины мгновенных отметок взволнованной поверхности и изополя значительных высот с выводом значений в контрольных точках. Представлен анализ полученных величин высот волн в полях с судном и без него.

Выводы. Анализ двух сценариев показал, что определение допустимых элементов волн у причала для безопасного обслуживания судов, выполненных по актуальным нормативным документам, может приводить к противоречиям, а именно между исходными данными для расчетов и значительным изменением полей волн акватории порта при взаимодействии волны с ошвартованным судном. Как следствие, это влияет на окончательное заключение о безопасном взаимодействии судов с причальными сооружениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, отражение волны, композитное моделирование, Западный транспортный логистический узел, Кольский залив, Многофункциональный грузовой район, залив Терпения, условия швартовки судна, поле волн

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кантаржи И.Г., Гогин А.Г., Нагорнова Ж.И. Нормативные методы и численное моделирование при определении параметров расчетных волн для портовых гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 95–107. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.95-107

Автор, ответственный за переписку: Жанна Ивановна Нагорнова, nagornova_zhanna10@mail.ru.

Normative methods and numerical modelling in determining the design waves for port hydraulic structures

Izmail G. Kantarzhi¹, Alexander G. Gogin², Zhanna I. Nagornova¹

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

² Engineering and construction company “ISTOK”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The importance of using composite modelling in the design of wave loads and impacts on port hydraulic structures, namely determining the parameters of design waves, is pointed out. The regulatory documents intended to calculate the permissible values of wave elements for the safe servicing of ships at the berth, some shortcomings are noted, some of which are described in this paper.

Materials and methods. Two objects are used as examples: the Western transport and logistics hub, designed in the Kola Bay of the Barents Sea (where the SWAN wind wave model and the COASTOX-CUR model of currents and water levels were used for numerical modelling, calculations by the analytical method were performed according to SR 38.13330.2018) and the Multifunctional Cargo Area located in the Terpeniya Bay of the Sea of Okhotsk (where calculations were carried out in the SWAN wind wave model and the SWASH long-wave model). For the first case, wave values at control points were used. In the second case, two calculation models were used to determine the influence of the vessel on the wave field — simplified and numerical ones.

Results. For the first example, the differences in the values of waves with and without reflection were analyzed using the analytical method. For the second, the modelling results are presented — the field of significant wave heights for a simplified wall with and without a vessel with a table of control point values. Modelling of a vessel in a mooring pocket is shown through pictures of instantaneous marks of the rough surface and the field of significant heights with the output of control point values. An analysis of the obtained height values in paintings with and without a vessel was performed.

Conclusions. Analysis of two problems showed that the determination of acceptable wave elements at the berth for the safe servicing of ships, carried out in accordance with current regulatory documents, can lead to contradictions, namely the initial data for calculations and a significant change in the wave fields of the port water area when the wave interacts with the moored vessel. As a consequence, this affects the final conclusion about the safe interaction of ships with berth structures.

KEYWORDS: numerical modelling, wave reflection, composite modelling, Western transport and logistics hub, Kola Bay, Multifunctional cargo area, Terpeniya Bay, conditions for mooring vessel, wave field

FOR CITATION: Kantarzi I.G., Gogin A.G., Nagornova Zh.I. Normative methods and numerical modelling in determining the design waves for port hydraulic structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):95-107. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.95-107 (rus.).

Corresponding author: Zhanna I. Nagornova, nagornova_zhanna10@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении предпроектных исследований волновых нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (ГТС) сегодня часто используется метод композитного моделирования [1, 2]. Этот метод интегрирует натурные измерения, расчетные методы, в том числе включенные в нормативные документы, физическое и численное моделирование. Метод композитного моделирования развивается, приемы разрабатываются. В работах [3–15] рассматриваются некоторые проблемы комбинированного моделирования, а именно задачи, решенные с помощью численных методов [3, 4] и авторских моделей, моделей открытого доступа [5–21].

В настоящей статье проводится сравнение аналитических методов, которые позволяют определить параметры расчетных волн у сооружения в контрольных точках, и численных методов, которые в дополнение к этому дают возможность установить поле волн в окрестности сооружения. Совместное использование аналитических методов и численного моделирования может приводить к сложностям и противоречиям. Эти вопросы обсуждаются в данном исследовании на примере проектирования условий безопасной швартовки судов у причальных набережных.

Подобные проблемы проанализированы для швартовки оснований гравитационного типа (ОГТ) у достроечной причальной набережной в Кольском заливе [3, 4]. ОГТ условно можно рассматривать как суда, однако это уникальные плавучие сооружения [5], отличающиеся большой массой и невозможностью отвода от причала в штормовых условиях. В настоящей работе также исследуется швартовка крупных судов — танкеров у причалов проектируемого портового комплекса «Многофункциональный грузовой район»

(МГР), расположенного на западном побережье залива Терпения Охотского моря южнее с. Новое.

Важной частью проектирования порта является оценка безопасных условий обслуживания судов у причальных сооружений. Для этого на данный момент среди действующих отечественных нормативных документов существуют: указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские ГТС (актуализированные в 2013 г.)¹, рекомендации по учету гидрометеорологического режима при проектировании недостаточно защищенных от волнения причалов² и рекомендации по определению допустимых ветро-волновых условий при проектировании морских портов (актуализированные в 2021 г.)³. Все три документа имеют примерно одинаковые методики выполнения оценки безопасных условий швартовки. Однако нет четких указаний условий использования отдельных документов.

В статье рассматриваются отличия результатов оценки безопасных условий обслуживания судов при разных подходах. В ходе выполнения расчетов также обнаружились моменты, которые не указываются или не уточняются в имеющихся нормативных документах: исходные данные параметров волнения (результаты численного моделирования или аналитических расчетов, учет волны без или с отражением

¹ Р 31.3.07–01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения: дополнение и уточнение СНиП 2.06.04–82*. М., 2001.

² РД 31.33.10–87. Рекомендации по учету гидрометеорологического режима при проектировании недостаточно защищенных от волнения причалов. М., 1987.

³ РД 31.33.03–88. Рекомендации по определению допустимых ветро-волновых условий при проектировании морских портов. М., 1989.

от сооружения), влияние судна на поле волн у причала. Таким образом, анализируются задачи на примере условий реальных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ни в одном из упомянутых нормативных документов не отмечается, следует ли принимать расчетную волну у причала в расчетах условий швартовки с учетом отражения волн от причала или принимать подходящую волну без учета отражения. Параметры расчетной волны по СП 38.13330.2018 определяются с учетом ее отражения от сооружений и преград, но других, расположенных поодаль от исследуемого сооружения. Учитывать ли отражение волн в расчетах условий швартовки от стенки, к которой пришвартовано судно? На этот счет в нормах ясности

нет. А в расчетах волновых нагрузок непосредственно на сооружение отражение волн входит в формулы расчета нагрузок.

Установлена возможная разница в результатах оценки безопасных условий швартовки судов у причалов на примере проектируемого сегодня морского терминала, предназначенного для обработки контейнеровозов и расположенного в Кольском заливе Баренцева моря. В рамках сопровождения проектирования по объекту авторами выполнялись научно-исследовательские работы по определению параметров ветрового волнения у гидротехнических сооружений. Местоположение терминала показано на спутниковом снимке (рис. 1).

В качестве исходных материалов для оценки использовались результаты численного моделиро-

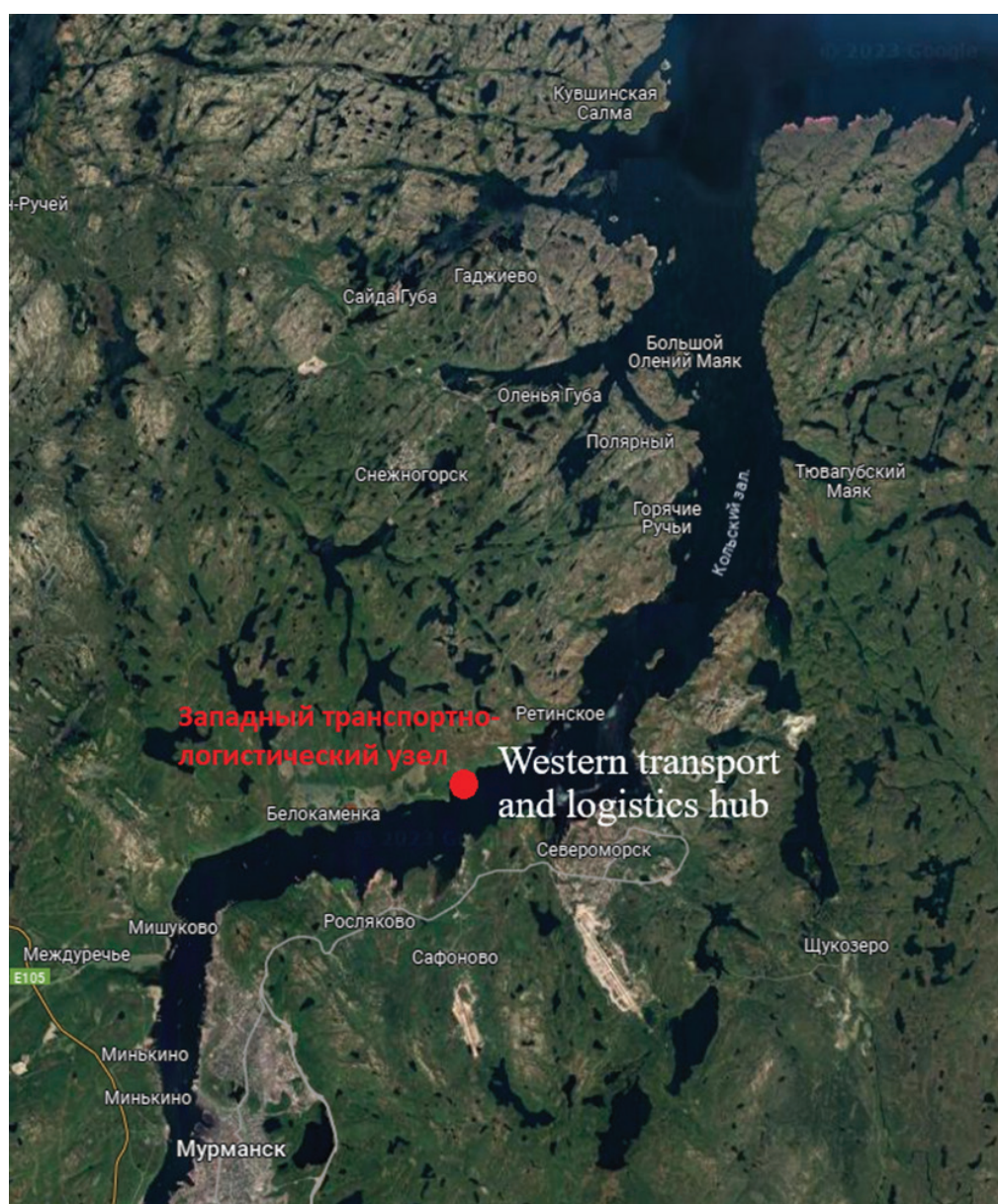


Рис. 1. Спутниковый снимок Кольского залива с указанием местоположения терминала

Fig. 1. Satellite image of the Kola Bay indicating the position of the terminal

вания и результаты аналитического расчета волн. Результаты расчета волн выполнены согласно СП 38.13330.2018⁴. Для численного моделирования применялась модель расчета ветровых волн SWAN^{5, 6}.

Алгоритм использования численных моделей предполагает первоначальное моделирование ветровых волн с помощью спектральной волновой модели с получением данных о волновых напряжениях в расчетной области. Затем инициализируется модель течений и уровней воды, в которую, помимо прочего, на вход задаются волновые напряжения. Следующий этап — пересчет режима ветровых волн с учетом развивающихся на акватории течений.

Спектральная модель ветрового волнения SWAN. В настоящее время в мировой практике для расчета волновой обстановки применяется подход, основанный на получении режимных параметров путем расчетов по гидродинамическим численным моделям [6, 7]. Возможность его использования оправдана тем, что имеются большие массивы входных данных для расчетов волнения, а модели, описывающие зарождение, распространение и затухание волн, позволяют определять различные статистические ха-

рактеристики волнения с приемлемой точностью. Применяемые гидродинамические модели волнения базируются на решении уравнения баланса волновой энергии в спектральной форме, а волновая обстановка на основе результатов такого моделирования является спектральным волновым климатом. Переход от спектров волнения к видимым элементам волн (высотам, периодам и т.д.) осуществляется по простым соотношениям через спектральные моменты.

Для данной работы был использован программный пакет SWAN. Выбор этого комплекса основан на ключевом преимуществе SWAN — нерегулярной сетке конечных элементов, которая обеспечивает более точное представление об исследуемой области. А применение 2D-модели считается достаточно точным для получения области построения.

Модель SWAN Делфтского технического университета, распространяемая в открытых кодах, в последнее десятилетие стала общепринятым в мировой практике береговой инженерии инструментом для расчета трансформации ветровых волн из зон глубоководья в прибрежную зону. Модель основана на уравнении баланса плотности волнового действия (или баланса энергии волн при отсутствии течений) с источниками и стоками.

Оценка безопасных условий взаимодействия судна с причальным сооружением проводилась для причала № 1, причала № 2 и причала портофлота с расчетными судами для направлений расчетных штормов пяти румбов: С, СВ, В, ЮВ и Ю повторяемостью один раз в год. Для определения условий швартовки

⁴ СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
⁵ Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007.
⁶ SWAN team. Swan cycle III version 41.10AB. Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2017.

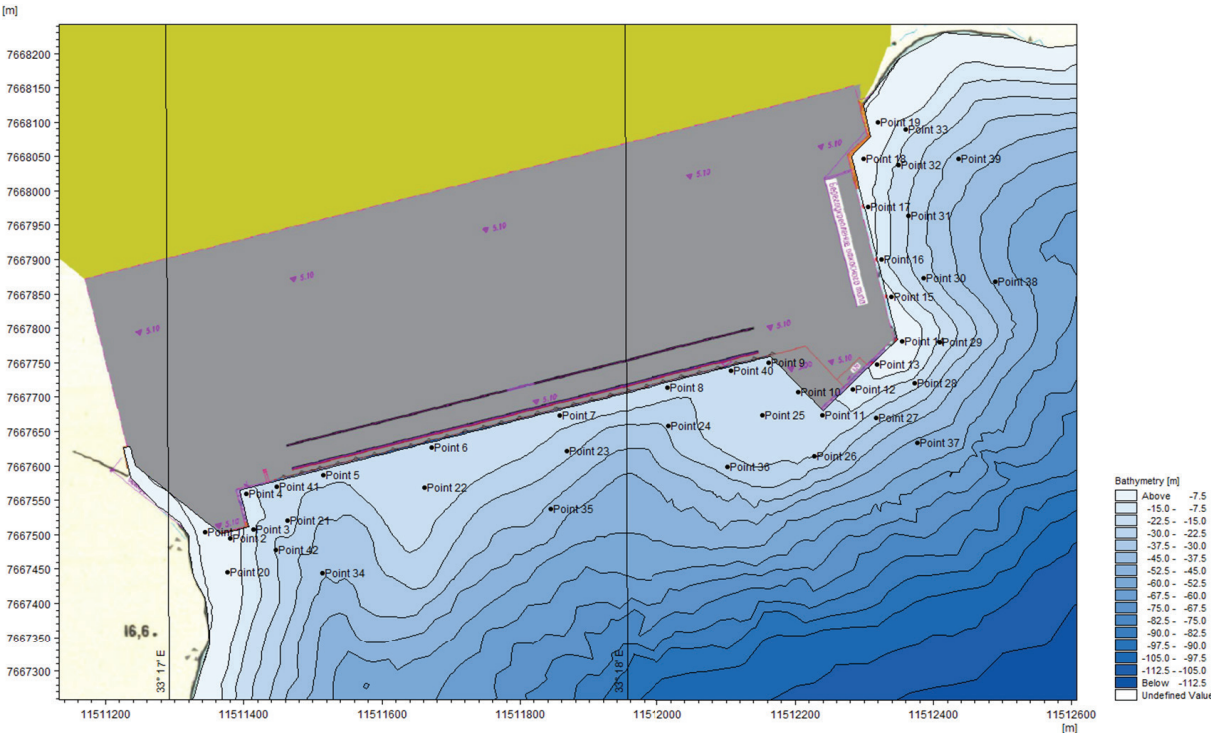


Рис. 2. Батиметрия акватории терминала с указанием контрольных точек выдачи результатов

Fig. 2. Bathymetry of the terminal with reference points for output results

используются высоты волн 5%-ной обеспеченности согласно действующей нормативной документации. Параметры волнения по СП 38.13330.2018 рассчитывались для расчетных штормов четырех направлений румбов: СВ, В, ЮВ и Ю. Не рассматривался С шторм, как и различное воздействие на причалы № 1 и 2 и причал портофлота.

Далее представлены параметры волнения, полученные в результате математического моделирования программой SWAN у причала № 1 (контрольные точки 5, 6 и 22), причала № 2 (контрольные точки 7, 8, 40, 23 и 24) и причала портофлота (контрольная точка 10) (табл. 1). Контрольные точки представлены на рис. 2.

В табл. 1 применяются следующие условные обозначения: $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны повторяемости один раз в год, м; $\bar{T}$ — средний период волны повторяемости один раз в год, с; $\bar{h}$ — средняя высота волны повторяемости один раз в год, м; $h_{5\%}$ — высота 5%-ной обеспеченности повторяемости один раз в год, м.

В результате анализа данных табл. 1 можно сделать вывод: отражение увеличивает высоты волн у причала (в нашем случае в виде вертикальной стенки) на 30–35 %, а в точках, отдаленных от причальной стенки на ширину расчетного судна, величина превышения отраженных волн и волн без отражения достигает 45–48 %.

Табл. 1. Параметры волн у причалов № 1, 2 и причала портофлота терминала, рассчитанные моделью SWAN и по СП 38.13330.2018 для волн различных направлений повторяемостью один раз в год, обеспеченностью 5 %

Table 1. Parameters of waves at the berths No. 1, 2 and the berth of the terminal’s port fleet calculated by the SWAN model and according to SR 38.13330.2018 for waves of different directions with repeatability 1 time per year with probability of exceedance of 5 %

Параметры без отражения / Parameters without reflection										СП 38.13330.2018 (аналитический метод) SR 38.13330.2018 (analytical method)
Направление подхода волн The direction of the wave approach	точка (т.) 5 point p. 5	т. 6 p. 6	т. 22 p. 22	т. 7 p. 7	т. 8 p. 8	т. 40 p. 40	т. 23 p. 23	т. 24 p. 24	т. 10 p. 10	
	$\bar{\lambda}$, м / m									
С / N	0,10	0,10	0,70	0,10	0,10	0,10	0,60	0,30	0,10	–
СВ / NE	7,10	7,00	6,80	6,30	3,90	1,30	6,30	6,00	0,50	5,81
В / E	6,10	6,00	6,10	5,80	5,00	3,80	6,00	5,90	3,50	7,57
ЮВ / SE	5,40	5,40	5,50	5,30	5,00	4,50	5,40	5,30	4,40	9,35
Ю / S	7,60	7,90	7,90	8,20	8,30	7,10	8,20	8,30	8,40	13,11
	$\bar{T}$, с / s									
С / N	0,30	0,30	0,70	0,20	0,30	0,30	0,60	0,40	0,30	–
СВ / NE	2,10	2,10	2,10	2,00	1,60	0,90	2,00	2,00	0,60	1,93
В / E	2,00	2,00	2,00	1,90	1,80	1,60	2,00	2,00	1,50	2,20
ЮВ / SE	1,90	1,90	1,90	1,80	1,80	1,70	1,90	1,80	1,70	2,45
Ю / S	2,20	2,20	2,20	2,30	2,30	2,10	2,30	2,30	2,30	2,90
	$\bar{h}$, м / m									
С / N	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	–
СВ / NE	0,16	0,16	0,19	0,14	0,10	0,05	0,18	0,17	0,03	0,26
В / E	0,20	0,19	0,21	0,18	0,15	0,11	0,20	0,19	0,08	0,30
ЮВ / SE	0,21	0,21	0,21	0,21	0,19	0,17	0,21	0,21	0,15	0,32
Ю / S	0,33	0,35	0,35	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,56
	$h_{5\%}$, м / m									
С / N	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	–
СВ / NE	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,49
В / E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,56
ЮВ / SE	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,59
Ю / S	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,98

Параметры с отражением / Parameters with reflectio									
Направление подхода волн The direction of the wave approach	точка (т.) 5 point p. 5	т. 6 p. 6	т. 22 p. 22	т. 7 p. 7	т. 8 p. 8	т. 40 p. 40	т. 23 p. 23	т. 24 p. 24	т. 10 p. 10
	$\bar{\lambda}, \text{ м / m}$								
C / N	0,10	0,10	0,80	0,10	0,10	0,10	0,60	0,30	0,10
CB / NE	11,50	10,80	10,70	10,10	8,10	1,30	10,20	9,00	0,50
B / E	7,50	6,80	7,20	6,40	5,90	5,00	6,80	6,40	4,80
IOB / SE	5,80	5,50	5,60	5,30	5,10	4,80	5,40	5,20	4,80
Ю / S	8,20	8,50	8,00	8,50	8,40	8,50	8,30	8,50	9,10
	$\bar{T}, \text{ с / s}$								
C / N	0,30	0,30	0,80	0,20	0,30	0,30	0,60	0,40	0,30
CB / NE	2,70	2,60	2,60	2,50	2,30	0,90	2,60	2,40	0,60
B / E	2,20	2,10	2,00	2,00	1,90	1,80	2,10	2,20	1,80
IOB / SE	1,90	1,90	1,90	1,80	1,80	1,70	1,90	1,80	1,80
Ю / S	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,40
	$\bar{h}, \text{ м / m}$								
C / N	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,05	0,03	0,01
CB / NE	0,31	0,22	0,27	0,19	0,13	0,06	0,21	0,17	0,03
B / E	0,33	0,26	0,29	0,24	0,20	0,14	0,25	0,22	0,09
IOB / SE	0,29	0,27	0,27	0,26	0,25	0,25	0,27	0,26	0,2
Ю / S	0,44	0,46	0,42	0,46	0,46	0,48	0,44	0,46	0,51
	$h_{5\%}, \text{ м / m}$								
C / N	0,02	0,02	0,08	0,02	0,02	0,02	0,08	0,05	0,03
CB / NE	0,54	0,40	0,48	0,34	0,24	0,10	0,37	0,30	0,06
B / E	0,58	0,47	0,52	0,42	0,36	0,26	0,49	0,39	0,16
IOB / SE	0,51	0,47	0,48	0,46	0,45	0,43	0,47	0,46	0,36
Ю / S	0,78	0,80	0,74	0,80	0,81	0,84	0,78	0,81	0,9

Следует отметить, что используемая в работе спектральная волновая модель, основанная на уравнении баланса волнового действия, не рассматривает фазу отдельных волн, что делает ее непригодной для точного расчета дифракции и отражения волн от стенок ГТС. Область применения спектральных волновых моделей не включает области, где отражение волн от сооружений имеет когерентный характер. Иными словами, где есть вероятность возникновения стоячих волн. На практике энергетические волновые модели при полном отражении волн «сглаживают» высоты интерферируемых волн перед сооружением и дают увеличение высоты волн примерно в 1,4 раза. Тогда как перед сооружением в реальности будут наблюдаться узлы и пучности стоячих волн, а высота стоячих волн будет в 2 раза больше высоты подходящих волн (на расстоянии до одной длины волн от сооружения). Тем не менее в статье рассматривается припричальная акватория с ошвартованными судами, что исключает возможность появления стоячих волн на акватории. Кроме этого, область постановки судов зачастую оказывалась шире одной длины под-

ходящих волн. Таким образом, увеличение высот волн в 1,4 раза, обусловленное повышением общей энергии волнения на прилегающей к причалам акватории, может быть с достаточной точностью определено с помощью спектральной волновой модели.

Следуя общей идее статьи, рассмотрим степень влияния зашвартованного судна на поле волн у причала. Вопрос следующий: нужно ли учитывать влияние судна на волны у причала при оценке безопасности швартовых операций.

Задача влияния судна на поле волн у причала решается на примере объекта, расположенного на западном побережье залива Терпения Охотского моря южнее с. Новое. Местоположение объекта на спутниковом снимке показано на рис. 3.

Проанализируем два варианта: судно, зашвартованное у основного причала (рис. 4), и судно, зашвартованное в защищенном «кармане» причальных сооружений (рис. 5). Первая часть задачи влияния судна на поле волн у причала решается в той же батиметрии, что и МГР, но с упрощенным рассмотрением взаимодействия причальной стенки (основной причал) с за-

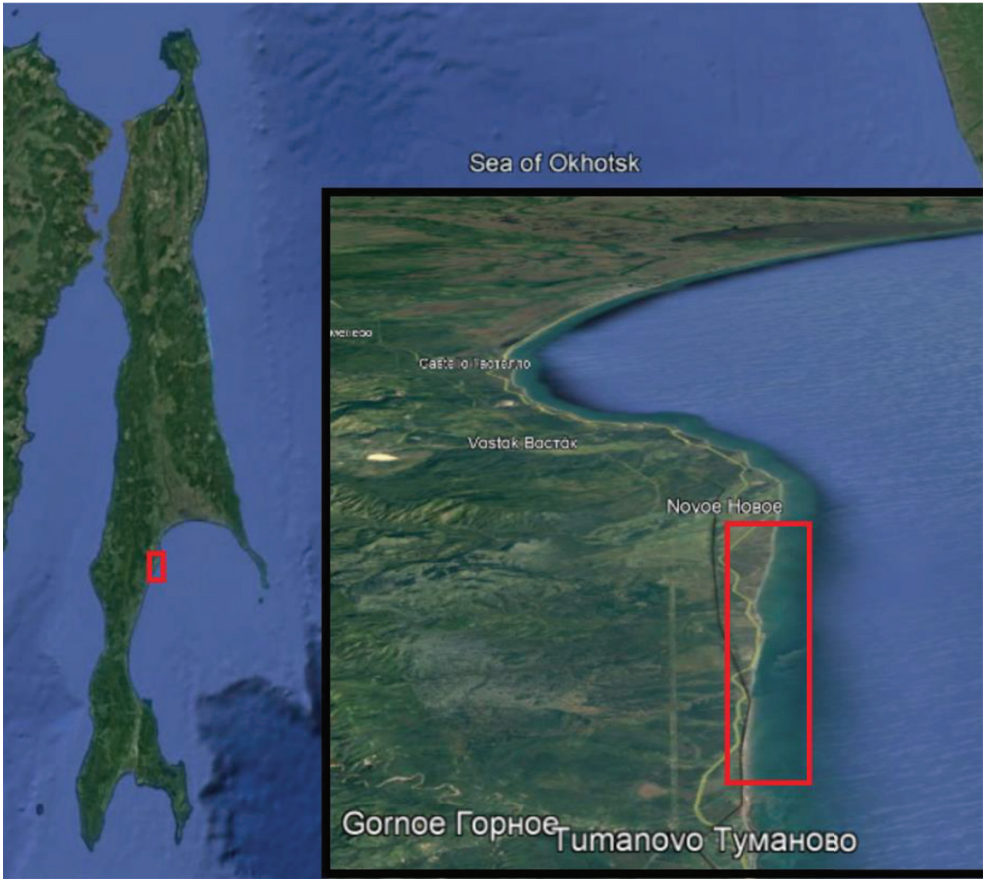


Рис. 3. Спутниковый снимок залива Терпениа Сахалинской области с указанием местоположения объекта
Fig. 3. Satellite image of the Terpeniya Bay of the Sakhalin region indicating the location of the facility

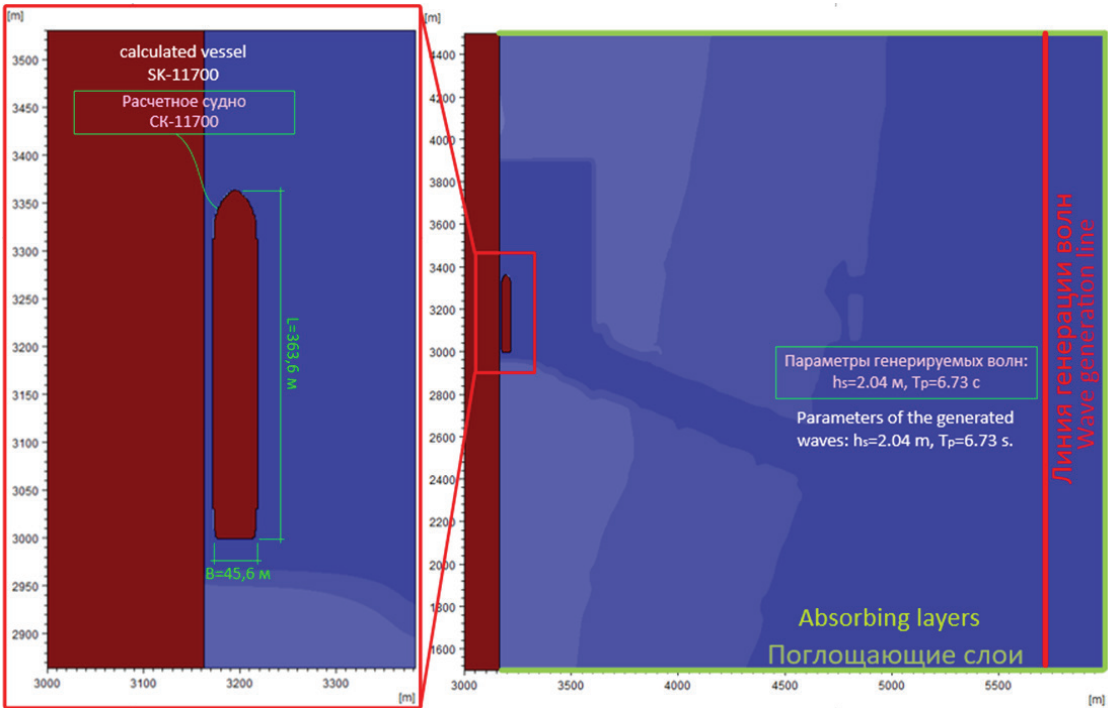


Рис. 4. Расчетная модель с указанием распределения глубин, расположения поглощающих и отражающих слоев численной модели, линии генерации волн, параметры генерируемых волн
Fig. 4. Calculation model with indication of depth distribution, arrangement of the absorption and reflection layers of the numerical model, wave generation lines, parameters of generated waves

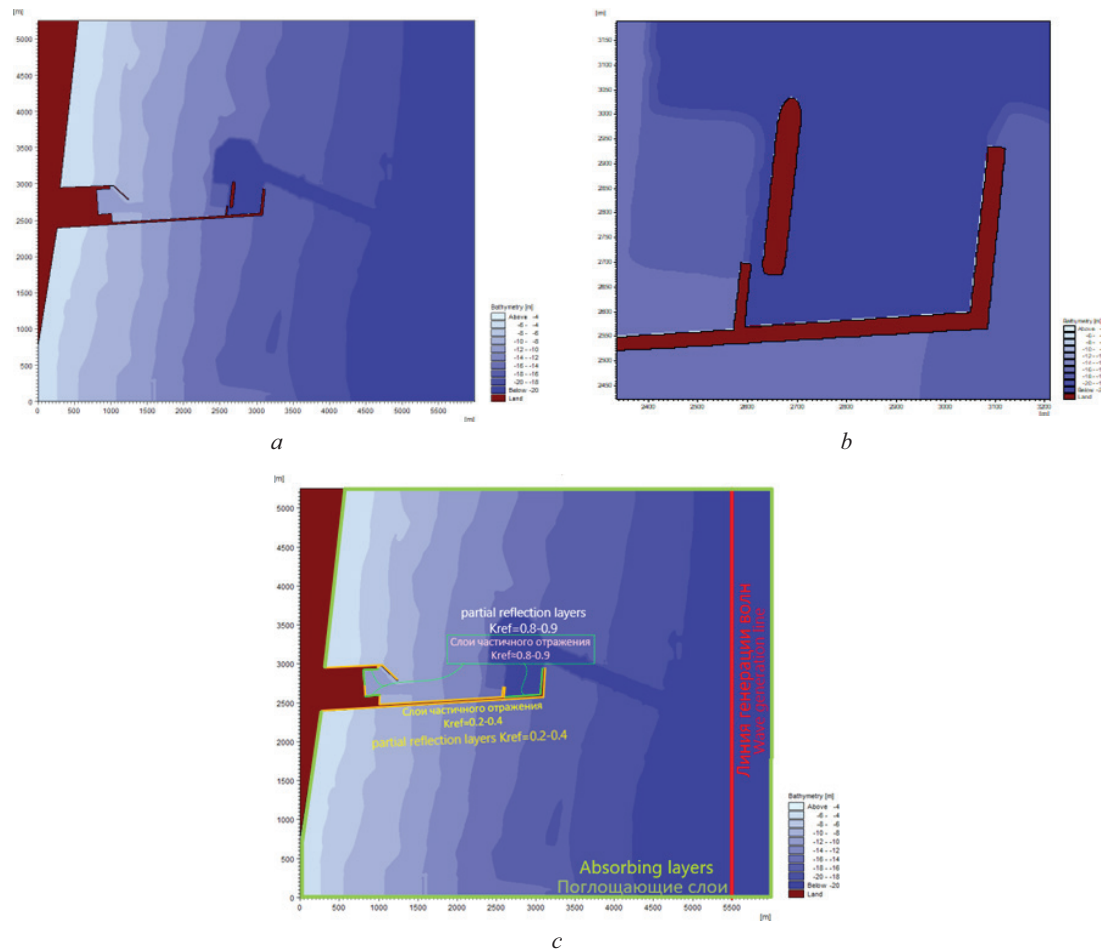


Рис. 5. Расчетная модель В шторм (с ошвартованным судном) (а, б); с указанием распределения глубин, расположения поглощающих и отражающих слоев, линии генерации волн (без ошвартованного судна) (с)

Fig. 5. Calculation model E (East) storm (with the moored vessel) (a, b); with indication of the depth distribution, arrangement of absorption and reflection layers, wave generation lines (without the moored vessel) (c)

швартованным судном (фронт рассматриваемой волны (расчетный шторм В (восточного) румба) параллелен линии кордона и диаметральной плоскости судна). В качестве расчетного судна взято СК-11700, наибольшая ширина — 45,61 м; общая длина — 363,57 м; осадка в балласте и грузу — 9,0/15,0 м соответственно; водоизмещение — 178,29 тыс. т. Параметры расчетной волны взяты из моделирования волнения на объекте МГР. Расчетная модель первой части представлена на рис. 4. Влияние объектов, расположенных до основного причала, не рассматривается.

Вторая часть задачи о влиянии судна на поле волн у причала, защищенного от волнения В румба, решается в батиметрии и плане сооружений объекта МГР. В этом случае рассматривается взаимодействие причальных сооружений определенной конфигурации, зашвартованного танкера большого водоизмещения и принимаемой ими волны (фронт практически параллелен диаметральной плоскости судна и линии кордона). Вторая часть задачи должна раскрыть последствие отражения волн в большей степени от судна, а далее их взаимодействия с причалом, защищенным от рассматриваемого волнения.

С целью моделирования использовались программы SWAN и SWASH⁷. Для численного моделирования волнового режима на небольшой акватории непосредственно у ГТС порта применяется современная негидростатическая волновая модель SWASH.

Волновая модель SWASH. Недавно разработанная длинноволновая модель SWASH основана на уравнениях нелинейной теории мелкой воды, включающих в отличие от общепринятой гидростатической версии интеграл давления по вертикали, расчет которого проводится на каждом временном шаге, что позволяет описывать негидростатическое распределение давления по глубине. Таким образом, численная реализация модели близка к многослойным вариантам моделей, основанных на уравнениях Буссинеска, обеспечивая дисперсионное соотношение модели SWASH, в линеаризованном случае близкое к точному дисперсионному соотношению линейной волновой теории [14–16].

⁷ SWASH. URL: <http://swash.sourceforge.net>

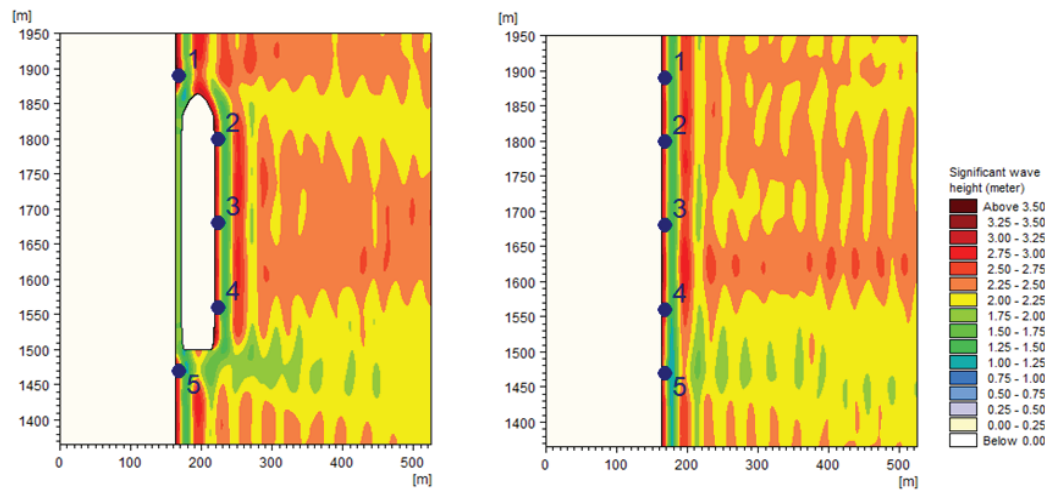


Рис. 6. Изополя значительных высот волн

Fig. 6. Isofield significant wave heights

Модель активно развивается в последние годы в приложении к различным задачам волновой гидродинамики прибрежной зоны, в том числе к задачам генерации длинных инфрагравитационных волн ветровыми волнами в прибрежной зоне, учитывает обрушение волн, формирование вдольбереговых течений, переформирования берегов. Модель становится альтернативным конкурентным инструментом по отношению к моделям, основанным на уравнениях типа Буссинеска, для моделирования негидростатических, длинноволновых процессов (т.е. диспергирующих волн) в прибрежной зоне шельфа.

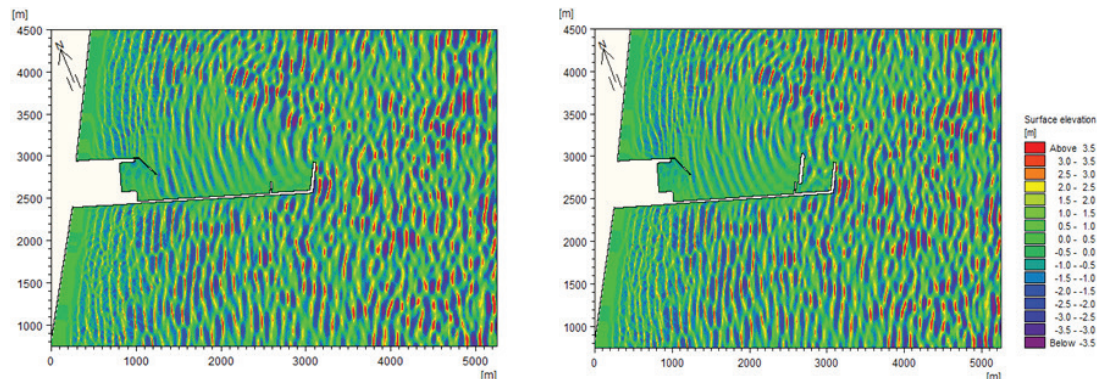
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 6 и в табл. 2 представлены результаты численного моделирования поля волн для судна, пришвартованного у основного причала.

Как видно из результатов моделирования для первого случая (рис. 6), влияние судна на высоты волн относительно невелико. Говоря об изменениях в изополях высот волн: правый борт судна выступает в роли препятствия, которое встречает фронт волны вместо причала, поэтому со стороны левого борта заметное снижение высоты волны. При этом, согласно данным табл. 2, волны при встрече с судном распределяются от кормы до носа на повышение. Однако без судна волны у самого причала у кормы значительно ниже, почти на 0,4 м. Модель показывает, что часть волн при встрече фронта волны параллельно корпусу судна заходит за судно, а основное наложение волн и увеличение их значения распространяется от носа и от кормы в направлении от судна. Таким образом, это может оказывать влияние на рядом зашвартованные суда.

Табл. 2. Высота волн в расчетных точках у основного причала

С судном / With vessel						Без судна / Without vessel					
Номер точки Number point	1	2	3	4	5	Номер точки Number point	1	2	3	4	5
$h_{13\%}$, м / m	3,26	2,82	2,76	2,75	2,74	$h_{13\%}$, м / m	2,85	2,83	2,70	2,71	2,32



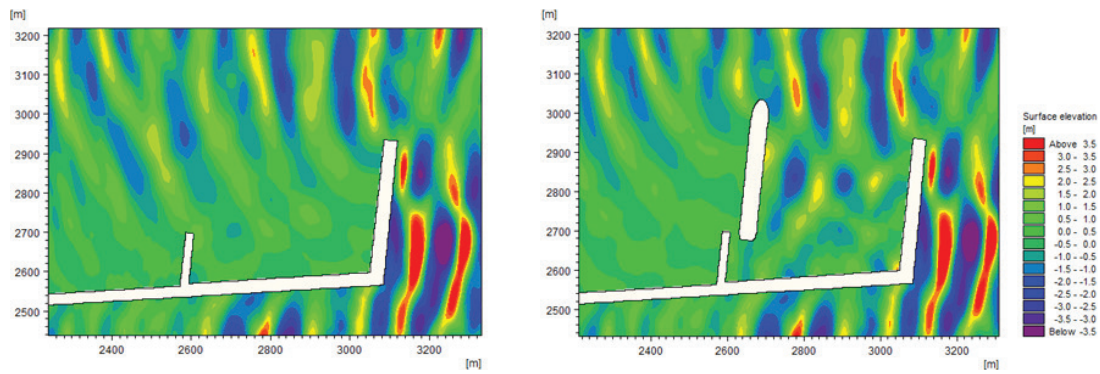


Рис. 7. Мгновенные отметки взволнованной поверхности при шторме В румба повторяемостью один раз в 25 лет
Fig. 7. Instant marks of excited surface in a storm E rumba with repeatability 1 time for 25 years

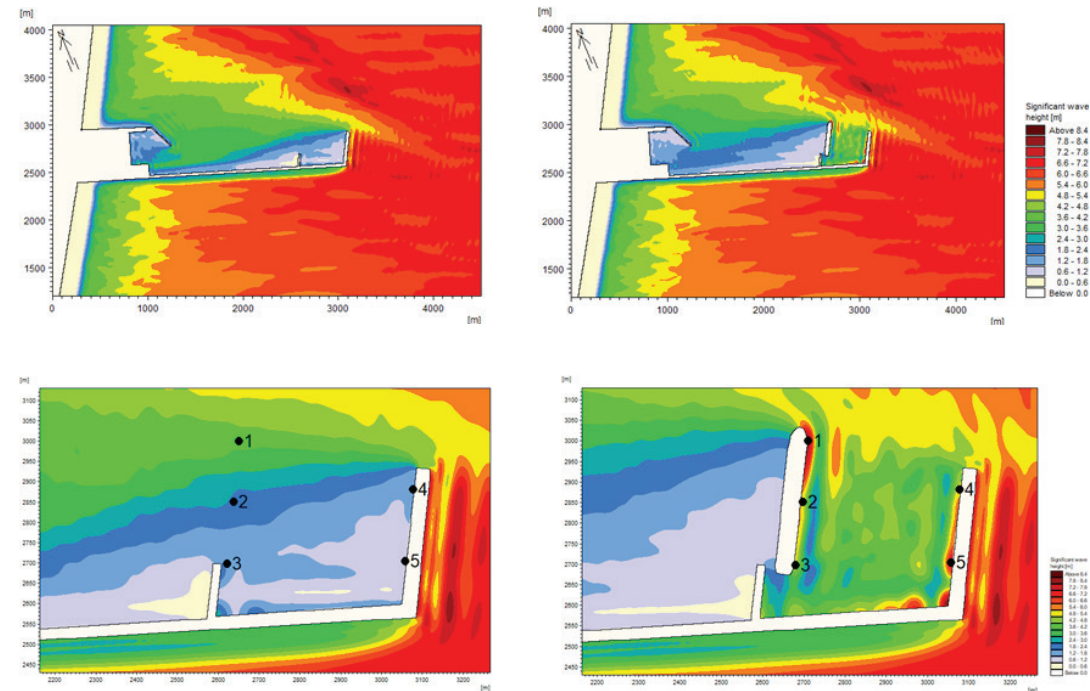


Рис. 8. Изополя значительных высот волн при шторме В румба повторяемостью один раз в 25 лет
Fig. 8. Isofield significant wave heights in a storm E rumba with repeatability 1 time for 25 years

Табл. 3. Высота волн в расчетных точках
Table 3. Wave height at calculation points

Без судна / Without vessel						С судном / With vessel					
Номер точки Number point	1	2	3	4	5	Номер точки Number point	1	2	3	4	5
$h_{13\%}$, м / m	8,12	5,16	4,76	5,03	6,91	$h_{13\%}$, м / m	3,81	2,32	1,64	1,57	0,87

Теперь обратимся ко второй части задачи — влияние судна на поле волн при его расположении внутри причального кармана. Результаты моделирования показаны на рис. 7, 8 и в табл. 3 в точках выдачи. В этом случае влияние зашвартованного судна на волны значительное. При рассмотрении изменений в высотах волн видно, что заметно уменьшение высоты у кормы и увеличение у носа при том, что основной фронт волн принимает на себя именно

нос судна. Часть волн, которые не уходят в направлении носа, отражаются от борта и уходят обратно, повышая значение высот волн у причала напротив, защищенного от В румба волнения, после чего опять возвращаются обратно к судну и гасятся только на откосе подходного мола. Увеличение высот волн к носу судна составляет более чем в два раза, с 3,81 до 8,12 м, у середины борта и кормы — тоже более чем в два раза. Большая часть

отраженной волны приходится на угол между причалом напротив и откосным молом — увеличение высоты на 6 м, т.е. волна активно нарастает и концентрируется в самом не тронутым до стоянки судна месте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что определение допустимых высот волн у причала в соответствии с актуальными нормативными документами может приводить к противоречиям. А именно, нормативные документы требуют использовать волны у причала, но не нормируют, следует ли учитывать отражение волн от причала и влияние зашвартованного судна на поле волн в причальной акватории. Согласно полученным результатам, учет отражения волн от причала, к которому пришвартовано судно, может увеличить

их высоту на 48 %, что в дальнейшем в значительной степени влияет на общие выводы о защищенности акватории от ветровых волн и прогнозируемое время работы причалов по метеоусловиям.

Приведенные примеры реальных условий проектируемых портовых комплексов показывают, что влияние рассмотренных факторов, отражение и корпус судна могут приводить к изменению высот волн в окрестности ошвартованного судна в разы. Взаимодействие зашвартованного судна с причальными сооружениями и волнением приводит к значительному изменению высот волн у защищенных от этого волнения причалов. Также это влечет изменения соответствующего заключения о безопасности швартовки.

Требуется дальнейшее уточнение нормативных методов расчета в рассмотренном направлении и развитие численных методов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gerritsen H., Sutherland J., Deigaard R., Sumer M., Fortes C.J.E.M., Sierra J.P. et al. Composite modelling of interactions between beaches and structures // Journal of Hydraulic Research. 2011. Vol. 49. Issue sup1. Pp. 2–14. DOI: 10.1080/00221686.2011.589134
2. Gerritsen H., Sutherland J., Santos J.A., Boo-gaard H., Caires S., Deigaard R. et al. Composite modeling // Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network. 2011.
3. Kantarzi I., Anshakov A. Interactive numerical model of hydrometeorologic factors in Kola Bay // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 03016. DOI: 10.1051/e3sconf/202126303016
4. Анишаков А.С., Кантаржи И.Г. Верификация численной гидродинамической модели Кольского залива // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 473–485. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.473-485. EDN WFGZVW.
5. Афремов А.Ш., Куликова А.Н., Смолина Н.А. Обеспечение безопасности стоянки пришвартованного крупнотоннажного судна в условиях ветра и волнения // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2011. № 59 (343). С. 109–122. EDN NQYKWJ.
6. Holthuijsen L.H. Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/cbo9780511618536
7. Booij N., Haagsma I.J., Holthuijsen L., Kieftenburg A., Ris R., van der Westhuysen A. et al. SWAN Cycle III version 40.51: user manual. 2004.
8. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Walden H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe. 1973. No. 12. 95 p.
9. Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation // Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III. 1997. Vol. 30. Pp. 343–352. DOI: 10.2495/CE970331
10. Berkhoff J.C.W. Computation of combined refraction — diffraction // Coastal Engineering 1972. 1972. Pp. 471–490. DOI: 10.1061/9780872620490.027
11. Berkhoff J.C. Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction. Delft, Hydraulic Laboratory, 1976. 102 p.
12. Hervouet J.M. TELEMAC, a hydroinformatic system // La Houille Blanche. 1999. Vol. 85. Issue 3–4. Pp. 21–28. DOI: 10.1051/lhb/1999029
13. Kofoed-Hansen H., Sloth P., Sørensen O.R., Fuchs J. Combined numerical and physical modelling of seiching in exposed new marina // Coastal Engineering 2000. 2001. Pp. 3600–3614. DOI: 10.1061/40549(276)281
14. Smit P., Stelling G., Zijlema M. Assessment of non-hydrostatic wave-flow model SWASH for directionally spread waves propagating through a barred basin // ACOMEN 2011. 2011.
15. Rijnsdorp D.P., Smit P.B., Zijlema M. Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using SWASH // Coastal Engineering Proceedings. 2012. Issue 33. P. 27. DOI: 10.9753/icce.v33.currents.27
16. Zijlema M., Stelling G., Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58. Issue 10. Pp. 992–1012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.015
17. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.Б. Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. № 4. С. 5–16. EDN NCCVAV.
18. Дикий П.В., Дзюба Н.Н., Железняк М.И., Соколин М.В. Моделирование волнового режима побережья Имеретинской низменности // International

Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Т. 7. № 2. С. 54–63. EDN PZEXEN.

19. Галенин Б.Г., Кузнецов В.В. Моделирование трансформации волн в прибрежной зоне // Водные ресурсы. 1980. Т. 1. С. 156–165.

20. Warner J.C., Geyer W.R., Lerczak J.A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assess-

ment // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2005. Vol. 110. Issue C5. DOI: 10.1029/2004JC002691

21. Warner J.C., Geyer W.R., Arango H.G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain to estimate estuarine residence time // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36. Issue 7. Pp. 921–935. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.11.008

Поступила в редакцию 5 июля 2024 г.

Принята в доработанном виде 17 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 17 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Измаил Григорьевич Кантаржи** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kantardgi@yandex.ru;

Александр Григорьевич Гогин — кандидат технических наук, ведущий специалист; **Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК»**; 115230, г. Москва, Варшавское ш., д. 46; alex.gogin@bk.ru;

Жанна Ивановна Нагорнова — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; nagornova_zhanna10@mail.ru.

Вклад авторов:

Кантаржи И.Г. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Гогин А.Г. — вычисления в программных комплексах SWAN, COASTOX и SWASH.

Нагорнова Ж.И. — написание исходного текста, оформление статьи, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gerritsen H., Sutherland J., Deigaard R., Sumner M., Fortes C.J.E.M., Sierra J.P. et al. Composite modelling of interactions between beaches and structures. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(sup1):2-14. DOI: 10.1080/00221686.2011.589134

2. Gerritsen H., Sutherland J., Santos J.A., Boogaard H., Caires S., Deigaard R. et al. Composite modelling. *Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*. 2011.

3. Kantarzh I., Anshakov A. Interactive numerical model of hydrometeorologic factors in Kola Bay. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:03016. DOI: 10.1051/e3sconf/202126303016

4. Anshakov A.S., Kantarzh I.G. Verification of the numerical hydrodynamic model of the Kola bay. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):473-485. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.473-485. EDN WFGZVW. (rus.).

5. Afremov A.S., Kulikova A.N., Smolina N.A. Ensuring the safety of moored large-tonnage vessel parking in conditions of wind and waves. *Transactions of the Krylov Shipbuilding Research Institute*. 2011; 59(343):109-122. EDN NQYKWJ. (rus.).

6. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/cbo9780511618536

7. Booij N., Haagsma I.J., Holthuijsen L., Kieftenburg A., Ris R., van der Westhuysen A. et al. *SWAN Cycle III version 40.51: user manual*. 2004.

8. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Walden H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*. 1973; 12:95.

9. Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation. *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III*. 1997; 30:343-352. DOI: 10.2495/CE970331

10. Berkhoff J.C.W. Computation of combined refraction — diffraction. *Coastal Engineering* 1972. 1972; 471-490. DOI: 10.1061/9780872620490.027

11. Berkhoff J.C. *Mathematical models for simple harmonic linear water waves: wave diffraction and refraction*. Delft, Hydraulic Laboratory, 1976; 102.

12. Hervouet J.M. TELEMAC, a hydroinformatic system. *La Houille Blanche*. 1999; 85(3-4):21-28. DOI: 10.1051/lhb/1999029

13. Kofoed-Hansen H., Sloth P., Sørensen O.R., Fuchs J. Combined numerical and physical modelling of seiche in exposed new marina. *Coastal Engineering* 2000. 2001; 3600-3614. DOI: 10.1061/40549(276)281

14. Smit P., Stelling G., Zijlema M. *Assessment of non-hydrostatic wave-flow model SWASH for directionally spread waves propagating through a barred basin*. ACOMEN 2011. 2011.
15. Rijnsdorp D.P., Smit P.B., Zijlema M. Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using SWASH. *Coastal Engineering Proceedings*. 2012; 33:27. DOI: 10.9753/icce.v33.currents.27
16. Zijlema M., Stelling G., Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*. 2011; 58(10):992-1012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.015
17. Divinsky B.V., Kosyan R.D., Kuklev S.B. Parameters of wind waves on the protected water areas. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2010; 3(4):5-16. EDN NCCVAV. (rus.).
18. Dikiy P.V., Dzyuba N.N., Zheleznyak M.I., Sorokin M.V. Modeling of wave climate of Imeretinsky lowland coast. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011; 7(2):54-63. EDN PZEXEN. (rus.).
19. Galenin B.G., Kuznecov V.V. Modeling of wave transformation in the coastal zone. *Water Resources*. 1980; 1:156-165. (rus.).
20. Warner J.C., Geyer W.R., Lerczak J.A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005; 110(C5). DOI: 10.1029/2004JC002691
21. Warner J.C., Geyer W.R., Arango H.G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain to estimate estuarine residence time. *Computers & Geosciences*. 2010; 36(7):921-935. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.11.008

Received July 5, 2024.

Adopted in revised form on October 17, 2024.

Approved for publication on October 17, 2024.

B I O N O T E S: **Izmail G. Kantarzh** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kantardgi@yandex.ru;

Alexander G. Gogin — Candidate of Technical Sciences, leading specialist; **Engineering and construction company “ISTOK”**; 46 Varshavskoe shosse, Moscow, 115230, Russian Federation; alex.gogin@bk.ru;

Zhanna I. Nagornova — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nagornova_zhanna10@mail.ru.

Contribution of the authors:

Izmail G. Kantarzh — scientific guidance, finalization of the text, final conclusions.

Alexander G. Gogin — calculations in software complexes SWAN, COASTOX and SWASH.

Zhanna I. Nagornova — writing the source text, design of the article, finalization of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interests.

Оценка круглосуточного теплового режима жилого помещения в теплый период года в г. Москве

Елена Георгиевна Малявина, Максим Игоревич Урядов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В современной проектной практике принято холодильные нагрузки на систему кондиционирования воздуха рассчитывать как сумму максимальных тепlopоступлений в помещение от отдельных источников. Температура внутреннего воздуха в подобных расчетах принимается равной требуемой по гигиеническим нормам. При этом расчет выполняется с рассмотрением стационарной тепlopередачи.

Материалы и методы. Расчету подвергался круглосуточный тепловой режим жилой комнаты в Москве, окно которой обращено на восток. Проведено сравнение результатов расчета при стационарном тепловом режиме и нестационарном. Поддержание температуры в помещении достигалось при ночной вентиляции наружным воздухом и дневном охлаждении воздухом от сплит-системы, а также системой охлаждения приточным воздухом. Температура охлажденного воздуха принималась 20 и 22 °C.

Результаты. Определены изменения в течение суток температуры внутреннего воздуха в помещении, ориентированном на восток. Выяснено, что при максимальной суточной температуре наружного воздуха 33 °C поддержание в помещении температуры внутреннего воздуха не выше 24 °C возможно только при круглосуточном охлаждении помещения приточным воздухом 22 °C и ниже. Возможен также вариант охлаждения помещения, начиная с 5 ч 45 мин утра приточным воздухом, охлажденным до 20 °C. При этом коэффициент пропуска солнечной теплоты окном должен быть не выше 0,5.

Выводы. Так как в последние годы наблюдаются более высокие температуры наружного воздуха, чем ранее, целесообразно повысить расчетную температуру наружного воздуха в теплый период года.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температура наружного воздуха, тепlopоступления от солнечной радиации, расчет, температура воздуха помещения, ночное проветривание, охлаждение приточным воздухом в дневное время и круглосуточно

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Малявина Е.Г., Урядов М.И. Оценка круглосуточного теплового режима жилого помещения в теплый период года в г. Москве // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 108–118. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.108-118

Автор, ответственный за переписку: Елена Георгиевна Малявина, email@list.ru.

Evaluation of the 24-hour thermal conditions of a dwelling room in the warm period of the year in Moscow

Elena G. Malyavina, Maksim I. Uryadov

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

ABSTRACT

Introduction. In modern design practice, it is customary to calculate the cooling capacity of an air-conditioning system as the sum of the maximum heat inputs into the room from the individual sources. The indoor air temperature in such calculations is assumed to be equal to the required temperature according to the hygienic norms. In this case, the calculation itself is performed with consideration of stationary heat transfer.

Materials and methods. The 24-hour thermal conditions of a dwelling room in Moscow with a window facing east were calculated. The calculation results were compared for steady-state and non-steady-state thermal conditions. Temperature maintenance in the room was achieved by night ventilation with outside air and daytime cooling with air from the Split-system, as well as by the cooling system with supply air. The chilled air temperature was assumed to be 20 and 22 °C.

Results. The changes during the day in indoor air temperature in a room oriented to the east were determined. It was found out that at a maximum daily outdoor air temperature of 33 °C, maintaining indoor air temperature not higher than 24 °C is possible only if the room is cooled with supply air of 22 °C and below 24 hours a day. It is also possible to cool the room starting at 5:45 a.m. with supply air cooled to 20 °C. In this case, the solar heat transmittance coefficient of the window should be no higher than 0.5.

Conclusions. Since in recent years there are higher outdoor air temperatures than before, it is advisable to increase the design outdoor air temperature during the warm period of the year.

KEYWORDS: outdoor air temperature, heat inputs from solar radiation, calculation, indoor air temperature, night ventilation, cooling with supply air in daytime and 24 hours a day

FOR CITATION: Malyavina E.G., Uryadov M.I. Evaluation of the 24-hour thermal conditions of a dwelling room in the warm period of the year in Moscow. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):108-118. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.108-118 (rus.).

Corresponding author: Elena G. Malyavina, email@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современной технической литературе разными авторами вопрос о потеплении климата рассматривается с различных сторон. Важными считаются причины потепления¹ [1] и необходимость изучения его последствий. Большее распространение получает кондиционирование воздуха с воздушным охлаждением в домохозяйствах, и, как ожидается, число установок продолжит расти из-за изменения климата и благодаря повышению уровня жизни². Через 20 лет оно составит 21 % в Испании и 35 % во Франции. Домохозяйства приспосабливаются к изменению климата путем использования кондиционеров, что приводит к увеличению расходов на электроэнергию на 35–42 %. Надо сказать, что со стороны специалистов по кондиционированию воздуха наблюдается большой интерес к проблеме сокращения нагрузки на эти системы. Так, в трудах [2, 3] исследуются нагрузки применительно к различным типам зданий. Актуален [4] также вопрос о перераспределении в течение года энергопотребления системами поддержания теплового микроклимата в помещении. Однако не учитывается [4] более высокая стоимость холода по сравнению со стоимостью теплоты. Поэтому приведет ли потепление климата к финансовому выигрышу — вопрос открытый. Рассматривается метод расчета нагрузки³ [5]. Отмечается необходимость учета нестационарного теплового режима помещений, в процессе которого формируется холодильная нагрузка [5, 6]. Изучается влияние вентиляционного режима эксплуатации здания на холодильную нагрузку в [7]. Делается акцент на выбор исходной климатической информации для определения установленной мощности и особенно суммарного годового потребления холода системами кондиционирования воздуха при обработке притока [8–10]. В статье [11] выдвигается на первый план влияние тепловлажностного режима, зависящего от наружных климатических условий, в теплом чердаке на состояние ограж-

дающих конструкций, подчеркивается значимость влияния климатических особенностей района строительства на уровень энергоэффективной тепловой защиты административных зданий [12]. Обращается внимание на различные конструкции кондиционеров и выбор наиболее подходящего для определенных условий [13]. Экономическая сторона вопроса для кондиционируемых помещений рассмотрена в работе [14]. Интересным также кажется использование солнечной радиации для охлаждения помещения, предлагаемое в публикации [15].

В проектной практике принято холодильные нагрузки на систему кондиционирования воздуха рассчитывать как сумму максимальных теплопоступлений в помещение от отдельных источников. Температура внутреннего воздуха в подобных расчетах принимается равной требуемой по гигиеническим нормам. При этом расчет выполняется с рассмотрением стационарной теплопередачи.

Таким образом, расчет теплопередачи через наружные ограждающие конструкции осуществляется по максимальной условной температуре наружной поверхности ограждающих конструкций.

В расчете с постоянной температурой наружного воздуха невозможно также учесть предварительный перегрев помещения, который имеет место перед началом рабочего дня, если помещение функционирует не круглосуточно. Кроме того, принимая некую постоянную максимальную температуру наружного воздуха, проектировщик не учитывает возможного понижения этой температуры в ночное время. В результате расчет требует приточный воздух нагревать, чего в теплый период года делать никто не будет.

В статье в качестве более точного метода расчета для оценки точности в определении холодильной нагрузки на кондиционеры стационарным методом применялся расчет нестационарного теплового режима помещения, разработанный ранее [16]. При этом теплопередача через каждую наружную и внутреннюю ограждающую конструкцию рассчитывалась методом конечных разностей по неявной схеме с шагом по времени 15 мин, а по координате 1 см. Температуры на внутренней поверхности каждого ограждения и воздуха находились из решения системы уравнений тепловых балансов поверхностей, обращенных в помещение, и воздуха.

Цель настоящего исследования — сравнение результатов расчета при рассмотрении стационарного теплового режима помещения и нестационарного для оценки точности стационарного метода; нахождение режима поддержания заданной температуры воздуха помещения в комнате.

¹ Изменение климата (информационный бюллетень Росгидромета). Декабрь 2020–январь 2021. № 88. 33 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/d2b/Izmenenie_klimata_N88_DecJan_2020.pdf

² Глобальное потепление и его влияние на продажи кондиционеров // Мир климата/холода. 2020. URL: <https://mir-klimata.info/globalnoe-poteplenie-i-ego-vliyanie-na-prodazhi-kondicionerov>

³ Как снизить нагрузку на систему кондиционирования воздуха // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2023. № 7. С. 40–47. EDN FJBLDI.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрено жилое помещение с круглосуточной эксплуатацией, т.е. комната в квартире многоквартирного дома в Москве в июле. Размеры помещения — 3,62 × 4,2 × 2,9(н) м. Окно, ориентированное на восток, имело сопротивление теплопередаче 0,66 м²·°C/Вт и размеры 2,0 × 2,06 м. Коэффициент, учитывающий затенение светового проема переплетами, равен 0,8. На окне учитывалась белая штора с коэффициентом пропускания солнечной радиации 0,4. Сопротивление теплопередаче наружной стены соответствовало базовому требуемому сопротивлению теплопередаче для жилья в Москве — 2,57 м²·°C/Вт.

На первом этапе помещение было рассчитано в 14 вариантах при круглосуточном охлаждении приточным подготовленным воздухом от вентиляционной установки. Проанализированы две конструкции окон: с прозрачной частью окна, имеющая коэффициент пропускания 0,74 и 0,5. Рассматривалась постоянная температура наружного воздуха в течение суток (как в ручном счете), при этом она приравнивалась к 33 и 26 °C. Температура приточного воздуха принималась равной 20 и 22 °C, при этом принимался двукратный или шестикратный воздухообмен помещения, постоянный в течение суток.

Выполнены расчеты при температуре наружного воздуха, изменяющейся в течение суток по гармо-

ническому закону с максимальными значениями 33 и 26 °C. Температуры притока приточного воздуха приняты теми же, что и при постоянной температуре наружного воздуха. В варианте с изменяющейся температурой наружного воздуха в расчет принимались только двукратные расходы приточного воздуха.

Также рассчитаны варианты охлаждения помещения в дневное время с помощью охлажденного воздуха от сплит-системы. Расход рециркуляционного притока был ограничен максимальной холодопроизводительностью сплит-системы 2,29 кВт с внутренним блоком MDSAG-07HRN1, с номинальной холодопроизводительностью 2,29 кВт и расходом рециркуляционного охлажденного воздуха (мин.–макс.) 350–530 м³/ч. Промежуточный расход равен 450 м³/ч.

При этом искомая температура помещения проверялась при поддержании постоянной температуры притока на тех же уровнях, что и при постоянном расходе приточного воздуха. Холодопроизводительность аппарата на каждом временном шаге расчета определялась по потребности в охлаждении помещения. Расход охлажденного воздуха назначался, начиная с наименьшего 350 м³/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При круглосуточной работе охлаждения и учете переменной температуры наружного воздуха максимальные температуры воздуха помещения и ре-

Табл. 1. Значения средней за сутки температуры внутреннего воздуха и результирующей температуры помещения при круглосуточном охлаждении помещения

Table 1. Values of daily average indoor air temperature and resulting room temperature for 24-hour cooling of the room							
Площадь окна, м² Window area, m²	Ориентация по сторонам света Orientation to the sides of the world	Расход приточного воздуха, м³/ч Supply air flow rate, m³/h	Средняя за сутки температура, °С Average daily temperature, °C				Амплитуда температуры наружного воздуха Amplitude of outdoor air temperature
			наружного воздуха outside air	притока Inflow	внутрен- него воздуха indoor air	результа- рующей resulting	
Помещение 3 Room 3							
4,12	Восток, 0,74 East, 0.74	88,18	33	22	29,36	30,11	0
		88,18	33	20	27,72	28,50	0
		264,54	33	22	24,83	25,66	0
		264,54	33	20	22,97	23,83	0
		88,18	26	22	27,96	28,60	0
		88,18	26	20	26,33	27,00	0
		264,54	26	22	24,30	25,01	0
		264,54	26	20	22,44	23,18	0
		88,18	27,95	22	28,34	29,01	5,05
		88,18	27,95	20	26,70	27,40	5,05
		88,18	20,95	22	26,96	27,51	5,05
		88,18	20,95	20	25,33	25,91	5,05
	Восток, 0,5 East, 0.5	88,18	20,95	22	25,38	25,79	5,05
		88,18	20,95	20	23,75	24,20	5,05

зультатирующей температуры на 1–2 °С ниже температуры при постоянной температуре. Естественно, что при увеличении расхода приточного охлажденно-

го воздуха в три раза t_v и $t_{рез}$ снижаются на 5–6 °С. Хороший эффект охлаждения на 2–3 °С дает также замена стеклопакета в окне на энергоэффективный,

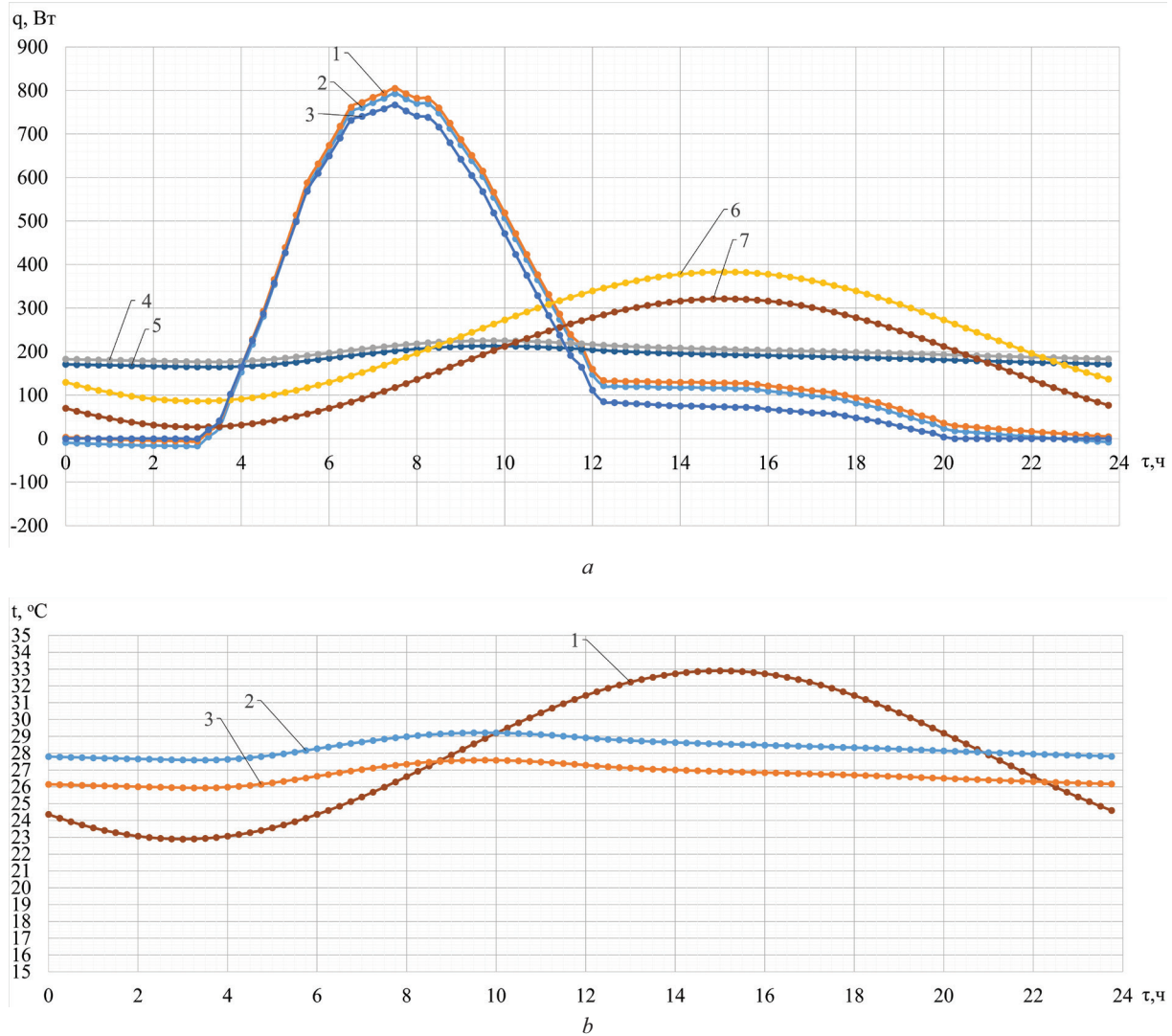


Рис. 1. Суточный ход потоков теплопоступлений и охлаждения при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +33 °С, двукратном воздухообмене и коэффициентом пропускания светопрозрачной частью окна 0,74: 1 — суммарные теплопоступления, Вт (при $t_{прит} = +20$ °С); 2 — суммарные теплопоступления, Вт (при $t_{прит} = +22$ °С); 3 — теплопоступления от солнечной радиации через прозрачную часть окна; Вт; 4 — тепловой поток, удаляемый вентиляционным воздухом из помещения, Вт (при $t_{прит} = +20$ °С); 5 — тепловой поток, удаляемый вентиляционным воздухом из помещения, Вт (при $t_{прит} = +22$ °С); 6 — тепловой поток, требующийся на охлаждение приточного воздуха, Вт (при $t_{прит} = +20$ °С); 7 — тепловой поток, требующийся на охлаждение приточного воздуха, Вт (при $t_{прит} = +22$ °С) (a); суточный ход температуры внутреннего воздуха при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +33 °С, двукратном воздухообмене и коэффициентом пропускания светопрозрачной частью окна 0,74: 1 — суточный ход температуры наружного воздуха, °С; 2 — суточный ход температуры внутреннего воздуха, °С (при $t_{прит} = +22$ °С); 3 — суточный ход температуры внутреннего воздуха, °С (при $t_{прит} = +20$ °С) (b)

Fig. 1. Daily course of heat input and cooling fluxes at variable outdoor air temperature with a maximum of +33 °С, twofold air exchange and a transmittance coefficient of the translucent part of the window of 0.74: 1 — total heat input, W (at $t_{inflow} = +20$ °С); 2 — total heat input, W (at $t_{inflow} = +20$ °С); 3 — heat inputs from solar radiation through the transparent part of the window; Вт; 4 — heat input removed by ventilation air from the room (at $t_{inflow} = +20$ °С); 5 — heat input removed by ventilation air from the room (at $t_{inflow} = +22$ °С); 6 — heat input required to cool the supply air (at $t_{inflow} = +20$ °С); 7 — heat input required to cool the supply air (at $t_{inflow} = +22$ °С) (a); daily course of indoor air temperature at variable outdoor air temperature with a maximum of +33 °С and twofold air exchange and a transmittance coefficient of the translucent part of the window of 0.74: 1 — daily course of outdoor air temperature, °С; 2 — daily course of indoor air temperature, °С (at $t_{inflow} = +22$ °С); 3 — daily course of indoor air temperature, °С (at $t_{inflow} = +20$ °С) (b)

хотя надо учитывать понижение освещенности помещения при этом. Результаты расчета приведены в табл. 1. Обращаем внимание на амплитуду темпера-

туры наружного воздуха: ее равенство нулю означает постоянную температуру наружного воздуха в течение суток (как при стационарном расчете). Расчет

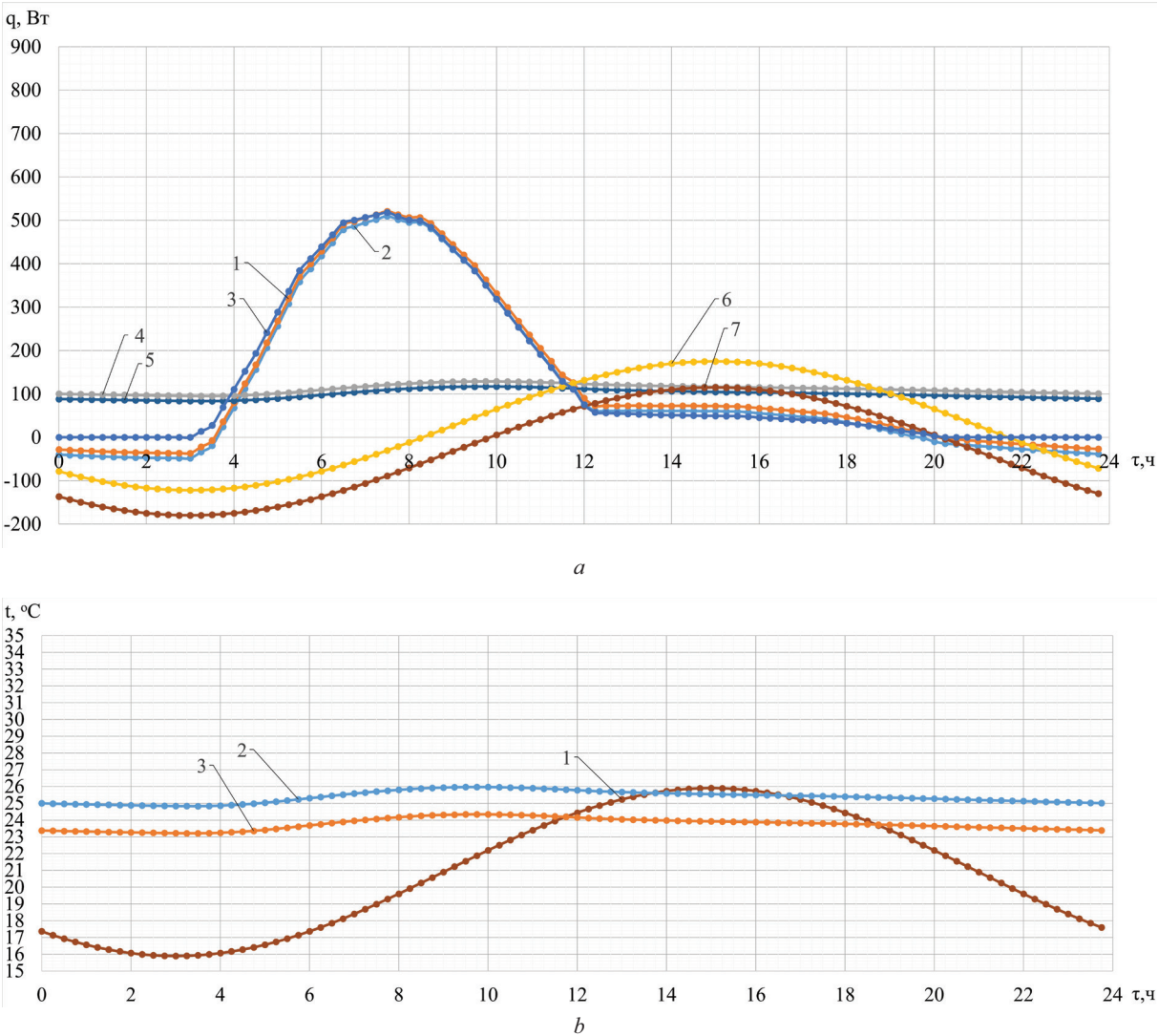


Рис. 2. Суточный ход потоков теплопоступлений и охлаждения при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +26 °С, двукратном воздухообмене и коэффициентом пропускания светопрозрачной частью окна 0,5: 1 — суммарные теплопоступления, Вт (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С); 2 — суммарные теплопоступления, Вт (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С); 3 — теплопоступления от солнечной радиации через прозрачную часть окна, Вт; 4 — тепловой поток, удаляемый вентиляционным воздухом из помещения, Вт (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С); 5 — тепловой поток, удаляемый вентиляционным воздухом из помещения, Вт (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С); 6 — тепловой поток, требующийся на охлаждение приточного воздуха, Вт (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С); 7 — тепловой поток, требующийся на охлаждение приточного воздуха, Вт (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С) (a); суточный ход температуры внутреннего воздуха при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +26 °С, двукратном воздухообмене и коэффициентом пропускания светопрозрачной частью окна 0,5: 1 — суточный ход температуры наружного воздуха, °С; 2 — суточный ход температуры внутреннего воздуха, °С (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С); 3 — суточный ход температуры внутреннего воздуха, °С (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С) (b)

Fig. 2. Daily course of heat and cooling fluxes at variable outdoor air temperature with a maximum of +26 °C, twofold air exchange and a transmittance coefficient of the translucent part of the window of 0.5: 1 — total heat input, W (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C); 2 — total heat input, W (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C); 3 — heat inputs from solar radiation through the transparent part of the window; 4 — heat input removed by ventilation air from the room (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C); 5 — heat input removed by ventilation air from the room (at $t_{\text{inflow}} = +22$ °C); 6 — heat input required to cool the supply air (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C); 7 — heat input required to cool the supply air (at $t_{\text{inflow}} = +22$ °C) (a); daily course of indoor air temperature at variable outdoor air temperature with a maximum of +26 °C, twofold air exchange and a transmittance coefficient of the translucent part of the window of 0.5: 1 — daily course of outdoor air temperature, °C; 2 — daily course of indoor air temperature, °C (at $t_{\text{inflow}} = +22$ °C); 3 — daily course of indoor air temperature, °C (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C) (b)

Табл. 2. Суммарные за сутки потоки теплопоступлений и охлаждения
Table 2. Total heat inputs and cooling fluxes per day

Температура, °С Temperature, °C						Тепловые потоки за сутки, Вт·ч Heat flows per day, W/h	
максимальная наружного воздуха maximum outdoor air	притока от сплит-системы of the inflow from the split system	максимальная воздуха помещения maximum room air	максимальная результатирующая помещения maximum resulting room	средняя за сутки воздуха помещения average daily room air	средняя за сутки результатирующая помещения average daily rate resulting room	охлаждения помещения room cooling	теплопоступлений в помещение heat inputs into the room
Коэффициент пропускания солнечной радиации 0,74, охлаждение с 8:15 до 22 ч Solar radiation transmittance coefficient 0.74, cooling from 8:15 to 22 hours							
26	20	23,6	24,25	22,33	22,96	5108	4975,5
26	22	24,906	25,497	23,75	24,47	4998,7	4696,9
33	20	26,491	26,510	23,47	24,20	5573,9	6033,95
Коэффициент пропускания солнечной радиации 0,5, охлаждение с 8:15 до 22 ч Solar radiation transmittance coefficient 0.5, cooling from 8:15 to 22 hours							
26	20	21,78	22,262	21,39	21,96	3569,1	3530,5
26	22	23,578	24,052	22,90	23,45	3457,1	3261,3
33	20	25,638	25,546	23,19	23,74	3983,8	4474,8
Коэффициент пропускания солнечной радиации 0,5, охлаждение с 8:15 до 22 ч, расход 350 м³/ч Solar radiation transmittance coefficient 0.5, cooling from 8:15 to 22 hours, flow rate 350 m³/h							
33	22	26,764	26,802	24,68	25,25	3751,5	4200,2
Коэффициент пропускания солнечной радиации окном 0,5, охлаждение с 8:15 до 22 ч, расход 450 м³/ч Solar radiation transmittance coefficient 0.5, cooling from 8:15 to 22 hours, flow rate 450 m³/h							
33	22	26,487	26,493	24,31	24,87	3386,6	4268,4
Коэффициент пропускания солнечной радиации 0,5, охлаждение с 5:45 до 22 ч, расход 350 м³/ч Solar radiation transmittance coefficient 0.5, cooling from 5:45 to 22 hours, flow rate 350 m³/h							
33	20	24,044	24,071	22,58	23,15	4044,1	4578,8
Коэффициент пропускания солнечной радиации окном 0,5, охлаждение с 5:45 до 22 ч, расход 450 м³/ч с 5:45 до 9:00 ч, расход 350 м³/ч с 9:15 до 22:00 Solar radiation transmittance coefficient 0.5, cooling from 5:45 to 22 hours, flow rate 450 m³/h from 5:45 to 9:00 hours 9:15 to 22:00 hours							
33	22	26,077	26,390	24,84	25,60	5491,0	5775,6
Коэффициент пропускания солнечной радиации 0,74, охлаждение круглосуточно, расход 450 м³/ч с 0:00 до 9:00 ч, расход 350 м³/ч с 9:15 до 24:00 Solar radiation transmittance coefficient 0.74, cooling 24 hours a day, flow rate 450 m³/h from 0:00 to 9:00 hours, flow rate 350 m³/h from 9:15 to 24:00 hours							
33	22	24,455	25,637	23,81	24,00	5525,4	5953,1
Коэффициент пропускания солнечной радиации окном 0,5, охлаждение круглосуточно, расход 350 м³/ч Solar radiation transmittance 0.5, cooling 24 hours a day, flow rate 350 m³/h							
33	20	21,872	22,616	21,46	22,09	4106,2	4764,9
33	22	23,823	24,552	23,41	24,02	3945,6	4416,6

с применением постоянной температуры наружного воздуха дает завышенные практически на 4 °С температуры внутреннего воздуха и результирующей температуры.

Рис. 1, а, 2, а объясняют, почему учет переменной температуры наружного воздуха с максимумом 33 °С приводит к большим теплопоступлениям в по-

мещение и более высокой температуре внутреннего воздуха, чем при максимуме 26 °С, а применение светопрозрачной части окна с коэффициентом пропускания солнечной теплоты 0,74 к тепловым потокам, большим, чем при окнах с теплопропусканием 0,5. Рис. 1, б и 2, б раскрывают, как указанные причины, а также применение более низкой температуры при-

тока влияет на формирование температуры внутреннего воздуха.

На втором этапе работы основной задачей являлось выявление подходящих для помещения, ориентированного на восток в Москве, режимов работы систем вентиляции наружным воздухом и охлажденным до 20 и до 22 °С воздухом сплит-системы. Так как расчеты выполнялись для жилой комнаты, то же-

лаемая температура должна была поддерживаться круглосуточно в диапазоне от 22 до 24 °С.

При максимальной суточной температуре наружного воздуха 26 °С в помещении с окном, имеющим коэффициент пропускания теплоты солнечной радиации 0,74, и включением сплит-системы в 8 ч 15 мин и ее работе непрерывно до 22 ч с минимальным расходом рециркуляционного воздуха 350 м³/ч

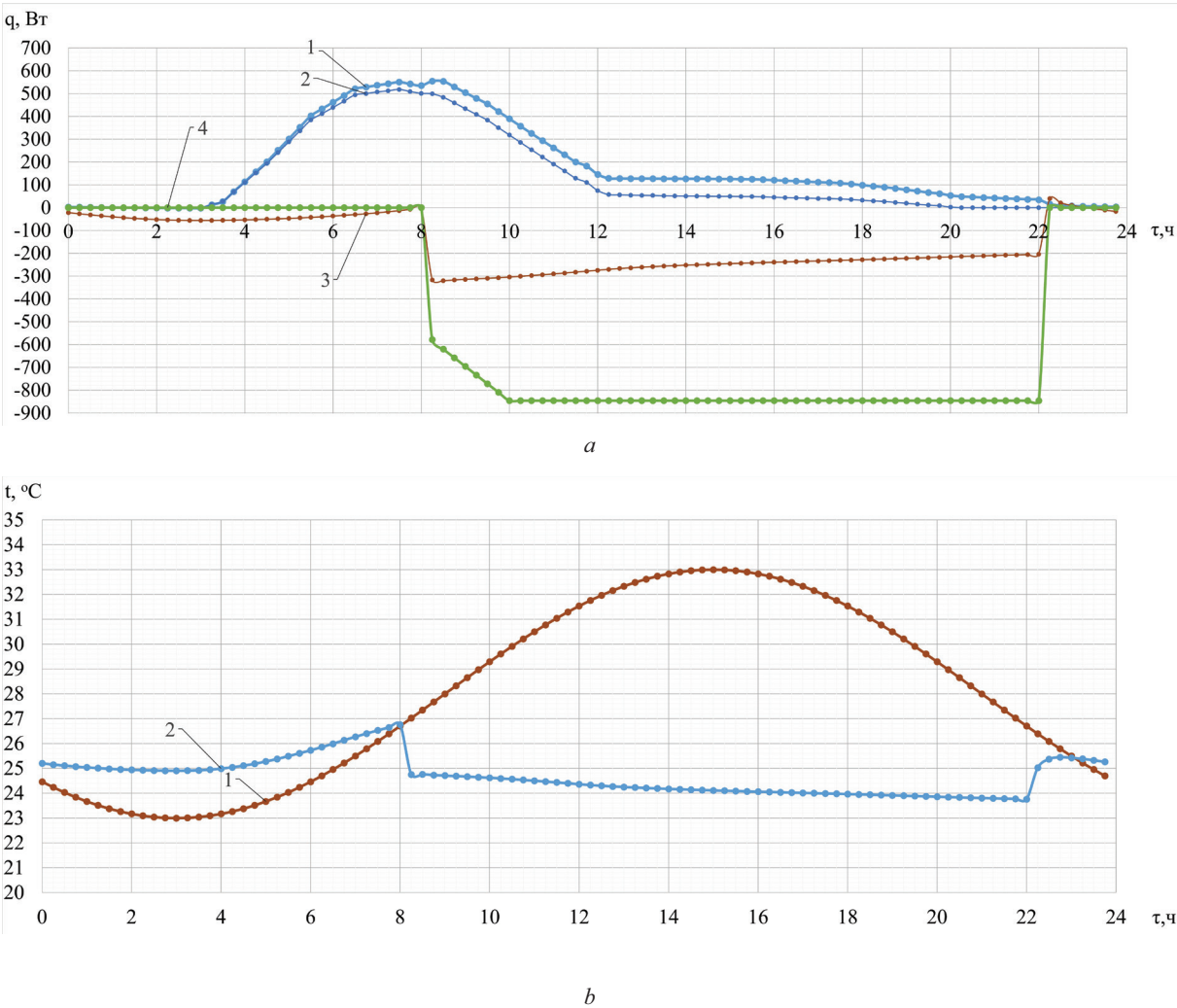
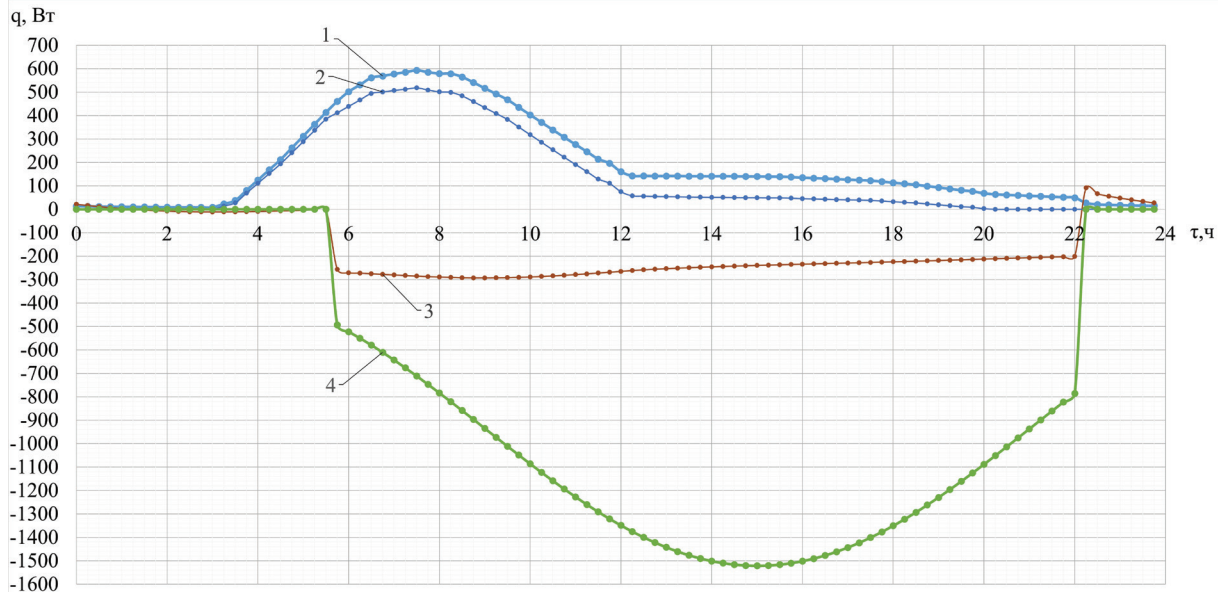
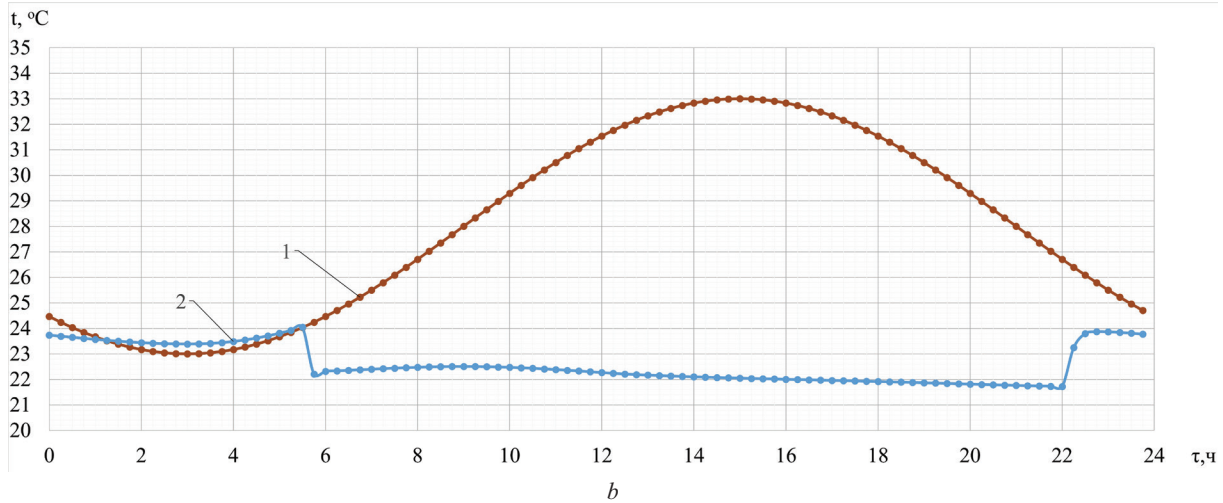


Рис. 3. Суточный ход потоков тепlopоступлений и охлаждения при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +33 °С, охлаждении с 8:15 до 22:00 и коэффициентом пропускания светопрозрачной частью окна 0,5: 1 — суммарные тепlopоступления, Вт (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С); 2 — тепlopоступления от солнечной радиации через прозрачную часть окна, Вт; 3 — тепловой поток, удаляемый вентиляционным воздухом из помещения, Вт (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С); 4 — тепловой поток, требующийся на охлаждение приточного воздуха, Вт (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С) (a); суточный ход температуры внутреннего воздуха при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +33 °С, двукратном воздухообмене и коэффициентом пропускания светопрозрачной частью окна 0,5: 1 — суточный ход температуры наружного воздуха, °С; 2 — суточный ход температуры внутреннего воздуха, °С (при $t_{\text{прит}} = +22$ °С) (b)

Fig. 3. Daily course of heat input and cooling fluxes at variable outdoor air temperature with maximum +33 °C, cooling from 8:15 to 22:00 and transmittance coefficient of the translucent part of the window 0.5: 1 — total heat input, W (at $t_{\text{inflow}} = +22$ °C); 2 — heat inputs from solar radiation through the transparent part of the window; 3 — heat input removed by ventilation air from the room (at $t_{\text{inflow}} = +22$ °C); 4 — heat input required to cool the supply air (at $t_{\text{inflow}} = +22$ °C) (a); daily course of indoor air temperature at variable outdoor air temperature with a maximum of +33 °C and twofold air exchange and a transmittance coefficient of the translucent part of the window of 0.5: 1 — daily course of outdoor air temperature, °C; 2 — daily course of indoor air temperature, °C (at $t_{\text{inflow}} = +22$ °C) (b)



a



b

Рис. 4. Суточный ход потоков тепlopоступлений и охлаждения при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +33 °С, охлаждения с 5:45 до 22:00 и коэффициентом пропускающей светопрозрачной частью окна 0,5: 1 — суммарные тепlopоступления, Вт (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С); 2 — тепlopоступления от солнечной радиации через прозрачную часть окна, Вт; 3 — тепловой поток, удаляемый вентиляционным воздухом из помещения, Вт (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С); 4 — тепловой поток, требующийся на охлаждение приточного воздуха, Вт (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С) (a); суточный ход температуры внутреннего воздуха при переменной температуре наружного воздуха с максимумом +33 °С, двукратном воздухообмене и коэффициентом пропускающей светопрозрачной частью окна 0,5: 1 — суточный ход температуры наружного воздуха, °С; 2 — суточный ход температуры внутреннего воздуха, °С (при $t_{\text{прит}} = +20$ °С) (b)

Fig. 4. Daily course of heat input and cooling fluxes at variable outdoor air temperature with maximum +33 °C, cooling from 5:45 to 22:00 and transmittance coefficient of the translucent part of the window 0.5: 1 — total heat input, W (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C); 2 — heat inputs from solar radiation through the transparent part of the window; 3 — heat input removed by ventilation air from the room (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C); 4 — heat input required to cool the supply air (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C) (a); daily course of indoor air temperature at variable outdoor air temperature with a maximum of +33 °C and twofold air exchange and a transmittance coefficient of the translucent part of the window of 0.5: 1 — daily course of outdoor air temperature, °C; 2 — daily course of indoor air temperature, °C (at $t_{\text{inflow}} = +20$ °C) (b)

достигается максимальная температура внутреннего воздуха 23,6 °С. В остальное время суток помещение проветривалось двукратным расходом вентиляционного наружного воздуха. При подаче охлажденного воздуха до 22 °С и максимальной температуре наруж-

ного воздуха 33 °С нужной температуры внутреннего воздуха достичь не удастся. Если помещение оборудовано окном с коэффициентом пропускающей солнечной теплоты 0,5, то нужного результата можно достичь даже при температуре притока 22 °С, если

включать охлаждение в 5 ч 45 мин при минимальном расходе охлажденного рециркуляционного воздуха. При температуре наружного воздуха 33 °С добиться температуры внутреннего воздуха не выше 24 °С не удастся даже при среднем расходе охлажденного воздуха 450 м³/ч. И только при круглосуточном охлаждении помещения можно добиться нужной температуры помещения. Суточные суммы поступающих в помещение потоков теплоты и потребность в охлаждающих потоках представлены в табл. 2.

Рис. 3, а, 4, а поясняют, почему в помещении, ориентированном на восток, более раннее включение охлаждения с более низкой температурой притока приводит к более низким тепловым нагрузкам на систему охлаждения. Рис. 3, б и 4, б раскрывают влияние разной температуры притока при одинаковой температуре наружного воздуха и одинаковом теплопропускании солнечной теплоты прозрачной частью окна.

Авторы поддерживают предложение [17] о необходимости пересмотра СП 131.13330.2022 в сторону увеличения расчетных температур в теплый период года из-за потепления климата. С этой необходимостью согласен В.К. Савин [18], признающий, что современные климатические нормы полностью еще не обновлены. Кроме того, они не учитывают

глобальное потепление и имеют недостаточный набор климатических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Если проветривать помещение наружным воздухом до 8 ч утра и после 22 ч вечера, а в остальное время охлаждать его двукратным расходом кондиционного воздуха, расчетные температуры воздуха и результирующей температуры помещения на 1–2 °С ниже наружной температуры. Хороший эффект охлаждения на 2–3 °С дает также замена стеклопакета в окне на энергоэффективный, хотя в расчетах не учитывалось понижение освещенности помещения при этом.

При ориентации помещения на восток и максимальной температуре наружного воздуха 33 °С добиться поддержания температуры внутреннего воздуха не выше 24 °С можно только при начале охлаждения помещения не позже 5:45 ч утра или при круглосуточном охлаждении помещения. Причем эта принятая температура наружного воздуха в Москве значительно выше расчетной 26 °С.

Целесообразно расчетные температуры наружного воздуха для теплого периода года повысить в связи с потеплением климата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Мохов И.И.* Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14. DOI: 10.31857/S0869587322010066. EDN NTZPAK.
2. *Боломатов В.Н.* Энергоэффективные решения при проектировании отопления, вентиляции и кондиционирования промышленных зданий // АВОВ: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2023. № 8. С. 48–55. EDN FAMCVN.
3. *Разаков М.А.* Перспективы применения системы кондиционирования воздуха в машинном зале канализационной насосной станции // Холодильная техника. 2023. Т. 112. № 2. С. 87–97. DOI: 10.17816/RF622931. EDN AYFGSN.
4. *Самарин О.Д., Лушин К.И.* Оценка влияния изменения климата на энергопотребление систем обеспечения микроклимата зданий // Жилищное строительство. 2020. № 1–2. С. 21–24. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-1-2-21-24. EDN DDSDEO.
5. *Фролова А.А.* Графический метод определения энергетических затрат системами климатизации при различном уровне теплозащиты офисного здания // Энергосбережение и водоподготовка. 2023. № 6 (146). С. 56–58. EDN FWDWEE.
6. *Костин В.И., Должикиов В.Н.* Влияние суточного режима работы общественных зданий на расход холода системами кондиционирования воздуха // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 4 (748). С. 65–71. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-748-4-65-71. EDN BXAAQM.
7. *Дацюк Т.А., Уляшева В.М., Пухкал В.А., Верховский А.А.* Влияние удельной вентиляционной характеристики офисных зданий на энергопотребление // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 1 (102). С. 73–83. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-1-73-83. EDN KKUPHF.
8. *Самарин О.Д.* Сравнение расчетов энергопотребления установками кондиционирования воздуха // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2024. № 3 (267). С. 61–63. EDN NCSXZL.
9. *Kumar G., De S., Thakur B.* Wall and air conditioner combination for the best energy and economic performance: Methodology demonstration for high-rise residential buildings // Energy Conversion and Management. 2024. Vol. 300. P. 117909. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117909
10. *Малявина Е.Г., Урядов М.И.* Способы задания исходных климатических данных для моделирования нестационарного теплового режима помещения. Мировой опыт // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 4 (772). С. 35–45. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-772-4-35-45. EDN ITJVUU.
11. *Дацюк Т.А., Анишукова Е.А.* Влияние тепло-влажностного режима теплых чердаков на состояние

ограждающих конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5 (76). С. 160–165. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-160-165. EDN ZNSFW.

12. Marwan M., Marwan M.D. Designing a pre-cooling model for air conditioning to avoid an electricity price spike for different building characteristics // Journal of King Saud University — Engineering Sciences. 2023. Vol. 35. Issue 7. Pp. 485–494. DOI: 10.1016/j.jksues.2021.07.004

13. Королева А.Н. Современные подходы к кондиционированию жилых зданий // Молодой ученый. 2019. № 9 (247). С. 99–101. EDN YYTBFZ.

14. Tanadecha P., Khaothong K. Thermoeconomic analysis of duct works for air-conditioned building in Thailand // Energy and Built Environment. 2023. Vol. 6. Issue 1. Pp. 80–95. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.09.002

15. Noferesti S., Ahmadzadehtalatapeh M., Gholami Motlagh V. The application of solar integrated absorption cooling system to improve the air quality and reduce

the energy consumption of the air conditioning systems in buildings — A full year model simulation // Energy and Buildings. 2022. Vol. 274. P. 112420. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112420

16. Малявина Е.Г., Ломакин А.Г. Учет теплоустойчивости помещения при расчете нагрузки на охлаждение помещения // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 2 (218). С. 80–84. EDN QBVVDT.

17. Ефремов С.Н., Тимофеев В.А., Гончар А.Б. Анализ использования системы кондиционирования воздуха с учетом десятилетнего изменения климата в городе Севастополь // Евразийский союз ученых. 2021. № 3–7 (84). С. 34–38. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335. 2021.7.84.1306. EDN ZUGKYF.

18. Савин В.К. Влияние глобального потепления на энергетическую эффективность здания // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2020. № 6. С. 52–59. EDN VLNPVJ.

Поступила в редакцию 16 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 29 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Георгиевна Малявина — кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 000-0002-5832-8530; email@list.ru;

Максим Игоревич Урядов — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; uyardovmaxim@yandex.ru.

Вклад авторов:

Малявина Е.Г. — концепция исследования, научное редактирование текста, написание итогового текста, итоговые выводы и заключение.

Урядов М.И. — идея, сбор и обработка материала, расчет и обработка результатов, составление графиков зависимостей, литературный обзор.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mokhov I.I. Climate change: causes, risks, consequences, and problems of adaptation and regulation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 92(1):3-14. DOI: 10.31857/S0869587322010066. EDN NTZPAK. (rus.).

2. Bolomatov V.N. Energy-Efficient Solutions for the Design of Heating, Ventilation and Air Conditioning of Industrial Buildings. *AVOK*. 2023; 8:48-55. EDN FAMCVN. (rus.).

3. Razakov M.A. Application prospects of a central air conditioning system in an engine room at a waste water pumping station. *Kholodilnaya Tekhnika*. 2023; 112(2):87-97. DOI: 10.17816/RF622931. EDN AYFGSN. (rus.).

4. Samarin O.D., Lushin K.I. Assessment of the impact of climate change on the energy efficiency of cli-

mate control systems of buildings. *Housing Construction*. 2020; 1-2:21-24. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-1-2-21-24. EDN DDSDEO. (rus.).

5. Frolova A.A. Graphical method for determining energy consumes by climating systems at different level of thermal protection of an office building. *Energy Saving and Water Treatment*. 2023; 6(146):56-58. EDN FWDWEE. (rus.).

6. Kostin V.I., Dolzhikov V.N. Influence of the daily operating mode of public buildings on the consumption of cold by air conditioning systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; 4(748):65-71. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-748-4-65-71. EDN BXAAQM. (rus.).

7. Datsuk T.A., Ulyasheva V.M., Pukhkal V.A., Verhovskiy A.A. Influence of specific ventilation characteristics of office buildings on energy consumption. *Bulletin*

of Civil Engineers. 2024; 1(102):73-83. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-1-73-83. EDN KKUPHF. (rus.).

8. Samarin O.D. *Comparison of calculations of energy consumption by air conditioning units. S.O.K. — Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2024; 3(267):61-63. EDN NCSXZL. (rus.).

9. Kumar G., De S., Thakur B. Wall and air conditioner combination for the best energy and economic performance: Methodology demonstration for high-rise residential buildings. *Energy Conversion and Management*. 2024; 300:117909. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117909

10. Malyavina E.G., Uryadov M.I. Methods of setting the initial climatic data for modeling the non-stationary thermal regime of the room. World experience. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; 4(772):35-45. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-772-4-35-45. EDN ITJVVU. (rus.).

11. Datsiuk T.A., Anshukova E.A. Impact of the heat-humidity regime of warm attics on the condition of enclosing structures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 5(76):160-165. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-160-165. EDN ZNNSFW. (rus.).

12. Marwan M., Marwan M.D. Designing a pre-cooling model for air conditioning to avoid an electricity price spike for different building characteristics. *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*. 2023; 35(7):485-494. DOI: 10.1016/j.jksues.2021.07.004

13. Koroleva A.N. Modern approaches to air conditioning of residential and public buildings. *Young Scientist*. 2019; 9(247):99-101. EDN YYTBFZ. (rus.).

14. Tanadecha P., Khaothong K. *Thermoeconomic analysis of duct works for air-conditioned building in Thailand. Energy and Built Environment*. 2023; 6(1):80-95. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.09.002

15. Noferesti S., Ahmadzadehtalatapeh M., Gholami Motlagh V. *The application of solar integrated absorption cooling system to improve the air quality and reduce the energy consumption of the air conditioning systems in buildings — A full year model simulation. Energy and Buildings*. 2022; 274:112420. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112420

16. Malyavina E.G., Lomakin A.G. *The room thermal stability to be considered when calculating the room cooling load. S.O.K. — Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2020; 2(218):80-84. EDN QBVVDT. (rus.).

17. Efremov S.N., Timofeev V.A., Gonchar A.B. Analysis of the use of the air conditioning system taking into account the ten-year climate change in the city of Sevastopol. *Eurasian Union Scientists*. 2021; 3-7(84):34-38. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.7.84.1306. EDN ZUGKYF. (rus.).

18. Savin V.K. Influence of Global Warming on Building Energy Efficiency. *AVOK*. 2020; 6:52-59. EDN VLNPVJ. (rus.).

Received September 16, 2024.

Adopted in revised form on September 29, 2024.

Approved for publication on October 20, 2024.

B I O N O T E S: **Elena G. Malyavina** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat, Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 000-0002-5832-8530; email@list.ru;

Maksim I. Uryadov — postgraduate student of the Department of Heat, Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; uryadovmaksim@yandex.ru.

Authors' contribution:

Elena G. Malyavina — research concept, scientific editing of the text, writing the final text, final conclusions and conclusion.

Maksim I. Uryadov — idea, collection and processing of material, calculation and processing of results, drawing up graphs of dependencies, literature review.

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.242

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.119-132

Влияние цифровых технологий на бизнес-модели промышленных предприятий строительной индустрии

Анна Романовна Булина, Наталья Анатольевна Солопова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Цифровые технологии (ЦТ) являются одним из драйверов развития всех сфер деятельности, в частности, строительной индустрии. Цифровизация оказывает качественное влияние на функционирование промышленных предприятий строительной индустрии (ППСИ), при этом внедряемые технологии в значительной степени воздействуют на бизнес-модели. Отсутствие комплексных исследований, направленных на изучение степени изменения бизнес-моделей ППСИ, обусловило актуальность настоящего исследования, цель которого — комплексное представление того, как будут изменяться бизнес-модели ППСИ под влиянием ЦТ.

Материалы и методы. Проведен комплексный анализ изменения бизнес-моделей ППСИ под влиянием процесса цифровизации. При выполнении анализа учитывались научные труды отечественных и зарубежных исследователей, а также использовались кейсы российских промышленных предприятий строительной индустрии. Подробно рассмотрены изменения в четырех сферах бизнеса: взаимодействие с потребителем, предложение, инфраструктура и финансовая эффективность компании; а также описаны изменения в девяти блоках бизнес-моделей: ключевые партнеры, основные виды деятельности, ценностное предложение, взаимодействие с клиентами, потребительский сегмент, ключевые ресурсы, каналы сбыта, структура издержек и потоки поступления доходов.

Результаты. Представлена общая схема изменения бизнес-модели ППСИ под влиянием технологий цифровой экономики: приведена типовая бизнес-модель, характерная для ППСИ до процесса цифровой трансформации, и бизнес-модель с характерными изменениями, которые будут происходить под воздействием цифровой трансформации.

Выводы. Осуществлен комплексный анализ влияния ЦТ на бизнес-модели ППСИ, сформировано единое представление цифровой трансформации их бизнес-моделей. Результаты настоящего исследования могут быть использованы и внедрены в практическую деятельность ППСИ, занимающихся цифровизацией своей деятельности в части внесения актуальных изменений в существующие бизнес-модели таких предприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бизнес-модель, сферы бизнеса, промышленные предприятия, строительная индустрия, цифровые технологии, цифровизация, цифровая трансформация, изменения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Булина А.Р., Солопова Н.А. Влияние цифровых технологий на бизнес-модели промышленных предприятий строительной индустрии // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 119–132. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.119-132

Автор, ответственный за переписку: Анна Романовна Булина, mochalova.anna@mail.ru.

Impact of digital technologies on the business models of construction industry enterprises

Anna R. Bulina, Natalia A. Solopova

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

ABSTRACT

Introduction. Digital technologies are one of the drivers of the development of all spheres of activity, in particular the construction industry. Digitalization has a qualitative impact on the activities of construction industry enterprises, while the technologies introduced significantly affect business models. The lack of comprehensive studies aimed at studying the degree of change in the business models of construction industry enterprises determined the relevance of this work, the purpose of which is a comprehensive representation of how the business models of construction industry enterprises will be changed under the influence of digital technologies.

Materials and methods. The paper provides a comprehensive analysis of changes in business models of construction industry enterprises under the influence of the digitalization process. The analysis took into account the scientific works of domestic and foreign researchers, and also used cases of Russian construction industry enterprises. The changes in all four

business areas are considered in detail: customer experience, offering, infrastructure and company financial performance; the changes in nine blocks of business models are also described in detail: key partners, key activities, key resources, value proposition, customer relations, sales channels, consumer segment, cost structure and income streams.

Results. A general scheme of changing the business model of construction industry enterprises under the influence of digital economy technologies is presented: a typical business model of construction industry enterprises before the digital transformation process and a business model with characteristic changes that will occur under the influence of digital transformation are presented.

Conclusions. During the study, a comprehensive analysis of the impact of digital technologies on the business models of construction industry enterprises was carried out, and a unified representation of the digital transformation of business models of construction industry enterprises was formed. The results of this study can be used and implemented in practical activities of construction industry enterprises engaged in digitalization of their activities in terms of making relevant changes to the existing business models of such enterprises.

KEYWORDS: business model, business areas, industrial enterprises, construction industry, digital technologies, digitalization, digital transformation, changes

FOR CITATION: Bulina A.R., Solopova N.A. Impact of digital technologies on the business models of construction industry enterprises. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):119-132. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.119-132 (rus.).

Corresponding author: Anna R. Bulina, mochalova.anna@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Роль цифровых технологий (ЦТ) в современной жизни сложно переоценить: об этом написано большое количество научных работ зарубежных и отечественных авторов. Технологии цифровой экономики изменяют привычный уклад хозяйственной деятельности всех сфер деятельности человека, в том числе оказывают значительное влияние на работу промышленных предприятий строительной индустрии (ППСИ): исключением не являются и бизнес-модели.

Бизнес-модель, по своей сути, — это описание основных принципов создания, развития и успешной работы компании [1]. Каждая компания может создавать свою уникальную бизнес-модель в зависимости от вида деятельности, размеров, опыта руководителей и собственников и других показателей, что делает количество бизнес-моделей практически неисчислимым. Например, на сайте Fourweekmba¹ представлено более 70 различных типов бизнес-моделей. Понятие бизнес-модели многогранно, поэтому исследователи смотрят на нее с различных точек зрения. В современной отечественной и зарубежной научной литературе много написано об изменении бизнес-моделей под влиянием ЦТ. Трансформации бизнес-моделей под влиянием ЦТ посвящено большое количество научных трудов, среди них выделим работы следующих авторов: В. Bencsik и др. [2], А. Eigner & Ch. Sary [3], М. Kohtamäki и др. [4], М.-А. Le-Dain и др. [5], М. Paiola и др. [6], М.Н. Дудин [7], Т.Б. Замбалаева [8], Д.С. Куликова [9] и др. Однако большинство статей и других научных работ, написанных на эту тему, либо включают обзор источников, либо рассматривают изменения бизнес-модели не в целом, а фрагментарно. Далее приведем некоторые работы, в которых исследуются изменения отдельных элементов бизнес-моделей предприятий.

¹ Business Model: 70+ Business Models Patterns In 2022. URL: https://fourweekmba.com/what-is-a-business-model/#Humanist_enterprise_business_model

О.И. Долгова и А.Ю. Никитаева [10] изучают цифровизацию промышленных компаний в разрезе сервитизации и кастомизации, и делают вывод о том, что сервитизация и кастомизация являются ведущими силами инноваций рассматриваемых компонентов бизнес-моделей, цифровизации отводится роль обеспечения их практической реализации.

Значительное количество работ посвящено влиянию Интернета вещей (IoT) на бизнес-модели предприятий. Так, С. Supratvech и соавт. [11], проведя систематический обзор научных источников, пришли к выводу, что при использовании IoT бизнес-модели будут фокусироваться на дополнительных предложениях цифровых сервисов для существующих продуктов. Они выделяют дополнительные четыре вида услуг, появившихся при использовании IoT: инновационные цифровые сервисы, поддержка предоставления услуг, использование клиентских данных и доставка по требованию. А. Eigner [12] обозначает ведущую роль IoT в трансформации бизнес-моделей в контексте преобразования услуг. Автор выделяет четыре типа бизнес-моделей, преобразованных с помощью IoT:

- «дополнение» [12], при котором к основному существующему продукту добавляются услуги и функции, что формирует дополнительную стоимость продукта;
- «совместное использование» [12], которое подразумевает оплату за доступ к продукту в течение ограниченного временного отрезка, что позволяет максимально эффективно использовать продукт (например, каршеринг, аренда самокатов с применением цифровых сервисов);
- «основанные на использовании» [12] бизнес-модели — когда покупатель оплачивает фактически использованный продукт (услугу) либо оформляет и продлевает подписку на применение продукта, IoT в данном случае фиксирует фактическое время использования;
- «ориентированные на решения» [12] бизнес-модели, суть которых состоит в предоставлении

услуг по обеспечению работы IoT, иными словами, такая модель направлена на создание решений и техническое обслуживание созданного продукта, которые помогут компаниям при внедрении IoT в течение срока действия договора.

Все перечисленные бизнес-модели имеют свою область применения и дают определенные преимущества при их использовании, общим и главным из которых служит снижение операционных издержек [12].

В статье G. Kane и соавт. [13], основываясь на результатах опроса менеджеров из 3700 предприятий в мире, который показал, что около 90 % компаний, имеющих высокий уровень цифровой зрелости, проводят интеграцию цифровой стратегии с общей стратегией организации, акцентируется внимание на важности своевременного внедрения ЦТ управленческой командой до возникновения конкурентных угроз, поскольку это отражается на удержании сотрудников и на том, насколько привлекательной является организация для новых талантов. Именно развитие и привлечение новых талантливых кадров, согласно опросу, — залог успеха компаний с высоким уровнем цифровой зрелости, также признается важной способность менеджмента к руководству в новых цифровых условиях и его умение создавать культуру, способствующую развитию цифровой зрелости в компании.

Mari Elizabeth Foley [14] в своей диссертационной работе выделяет общую бизнес-проблему при цифровизации промышленного предприятия, которая заключается во внешней конкуренции и высоких ожиданиях со стороны клиентов, а также более узкую проблему, которая состоит в том, что «отсутствие или медленное цифровое внедрение Индустрии 4.0 на производственном предприятии мешает фирме привлекать лучших специалистов, конкурировать с ведущими конкурентами и увеличивать долю рынка». Она акцентирует внимание на важности выстраивания культуры предприятия, основанной на доверии, построении отношений и общении с другими людьми, на вопросах преемственности опыта от сотрудников, уходящих на пенсию, к молодому поколению.

Н.С. Мрочковский и соавт. [15] рассматривают процесс цифровой трансформации как переход бизнеса в виртуальное пространство, при котором происходит «исключение человека из процессов обеспечения, учета и контроля» [1]. Исследуя цифровые бизнес-модели крупных иностранных компаний, он отмечает сложности, связанные с внедрением цифровых процессов: «нехватка квалифицированных IT-специалистов и разработчиков программного обеспечения», высокую стоимость требуемого оборудования и «необходимость поддержания интернет-соединения на высоком уровне».

Кроме фрагментарных исследований о влиянии ЦТ на отдельные элементы бизнес-моделей следует отметить существование комплексных исследований в данной области. J.M. Muller и соавт. [16] в качестве основных изменений, происходящих под влиянием Индустрии 4.0, выделяют три аспекта:

«полноценную цифровизацию процессов, интеллектуальное производство и взаимодействие между компаниями» [16]. В работе [16] рассматриваются малые и средние предприятия и на их примере показывается влияние Индустрии 4.0 на элементы бизнес-моделей предприятий обрабатывающей промышленности. В ходе проведенного опроса было выявлено, что при создании ценности основными проблемами становятся высокий уровень инвестиций в необходимое оборудование и IT-инфраструктуру, а также затраты на квалифицированные кадры и техническое обучение сотрудников. При реализации ценности ведущей инновацией станет сервитизация, которая для предприятий обрабатывающей промышленности подразумевает ремонт и техническое обслуживание, а также обозначается важностью таких инноваций, как «совместная разработка продуктов в режиме реального времени» [16], анализ данных и увеличение степени клиентоориентированности.

В публикации А.В. Олифирова [17] проводится комплексный анализ изменений всех элементов бизнес-модели в соответствии с шаблоном А. Остервальда [1], происходящих под воздействием ЦТ. В статье подробно рассмотрены изменения в предпринимательской деятельности, появляющиеся в новых цифровых условиях, однако объектом исследования в настоящей работе является электронная торговля в интернете и в социальной маркетинговой среде. Специфика такой работы подразумевает ведение деятельности в виртуальной среде, соответственно вопросы производства в исследовании не раскрываются и цифровые технологии, применяемые на промышленных предприятиях, также не рассматриваются.

Описание изменений элементов канвы бизнес-моделей было представлено в статье М.Ю. Гордеева и др. [18]. За основу анализируемой единицы принята ЦТ, в ходе работы было определено, на какие элементы канвы бизнес-модели могут оказать влияние определенные технологии (большие данные, IoT, блокчейн, робототехника, искусственный интеллект (ИИ), виртуальная реальность). Такой подход дает более полное представление об изменении бизнес-моделей промышленных предприятий под влиянием ЦТ, чем при фрагментарном исследовании отдельных его элементов, однако в статье [18] затрагивается описание не всех блоков бизнес-модели, что не позволяет говорить о полном комплексном рассмотрении изменения бизнес-моделей под влиянием цифровой экономики.

После анализа научных источников об изменении бизнес-моделей под воздействием цифровизации выявлено, что большинство рассмотренных исследований носят фрагментарный характер, при этом отсутствует единое концептуальное видение того, как именно будут меняться бизнес-модели ППСИ при внедрении ЦТ, что определило актуальность проводимого исследования и его цель: выполнить комплексный анализ изменений, возникающих в бизнес-моделях ППСИ при внедрении в работу цифровых технологий.

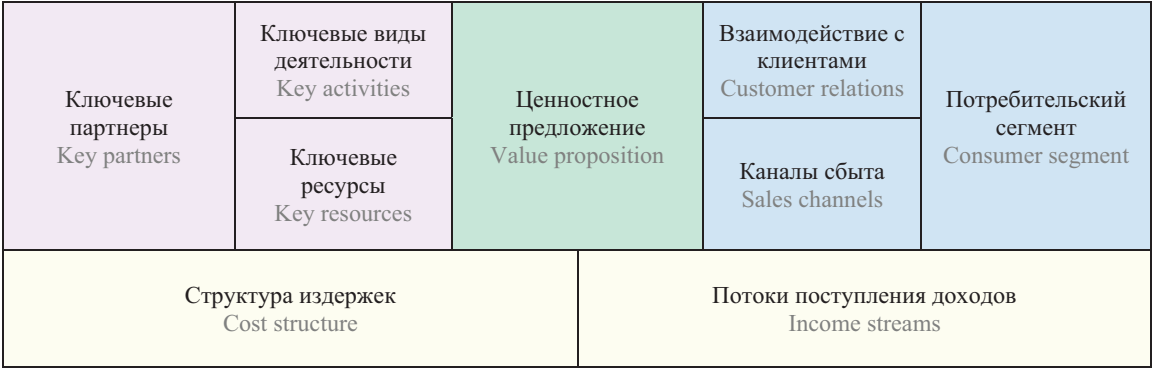


Рис. 1. Шаблон бизнес-модели по А. Остервальду [1]

Fig. 1. Business model template according to A. Osterwald [1]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве ключевого научного метода в настоящей работе используется анализ. За основу анализа взят шаблон бизнес-модели, предложенный А. Остервальдом и И. Пинье (рис. 1), включающий девять блоков, охватывающих «четыре основные сферы бизнеса: взаимодействие с потребителем, предложение, инфраструктуру и финансовую эффективность компании» [1].

Автором была подготовлена общая схема бизнес-модели, которая используется ППСИ до проведения цифровизации их деятельности. Далее осуществлен анализ научных трудов российских и иностранных исследователей и аккумулирована информация о ЦТ, внедряемых на ППСИ. На базе полученных данных подготовлена общая схема бизнес-модели ППСИ с элементами, характерными для цифрового этапа. В начале основной части исследования предлагается общий вид изменения бизнес-модели, а далее по тексту отдельно разбираются конкретные изменения по каждому блоку бизнес-модели и какие технологии на это повлияли.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 представлена общая схема изменения бизнес-модели ППСИ под влиянием технологий цифровой экономики. В верхней части рисунка приведена типовая бизнес-модель, характерная для ППСИ, в нижней части — изменения в бизнес-моделях, которые произойдут под воздействием цифровой трансформации.

Далее подробнее остановимся на каждом блоке бизнес-модели и проанализируем, какие технологии оказывают влияние на все четыре сферы бизнеса и входящие в их состав блоки бизнес-модели.

Сфера «Взаимодействие с потребителем»

1. Потребительский сегмент

Традиционно потребительский сегмент ППСИ нацелен на массовый рынок (например, для производителей товаров массового потребления: отделочные материалы, метизы и др.) либо нишевой рынок (например, для производителей специфического обо-

рудования, бетонных смесей и др.). Применение ЦТ кардинально не изменяет потребительский сегмент, но при этом появляется его характерная отличительная особенность — ориентация на клиента (потребителя).

Weill и Woerner [19, 20] в своей работе дают ряд рекомендаций компаниям для достижения большего успеха, в том числе:

- следует лучше понимать клиента, и при этом ориентироваться не на интуицию, как это было ранее, а учитывать преимущества «эпохи больших данных» и принимать решения на основе фактических данных, с помощью информационных панелей и других показателей;
- сосредоточиться на клиентоориентированной бизнес-модели, что переводит компанию из категории производителя товаров в категорию удовлетворения потребностей своих клиентов [19].

Среди отечественных ППСИ есть такие, которые демонстрируют приверженность клиентоориентированной бизнес-модели. Например, клиентоцентричность в числе других аспектов лежит в основе в долгосрочной Стратегии развития Группы компаний «Свеза»². На клиентоориентированность нацелено и ПАО «ТМК»: в соответствующем разделе на официальном сайте компании говорится о том, что «развитие всесторонних взаимовыгодных отношений с клиентами является одним из направлений повышения эффективности деятельности компании»³. Для повышения «степени удовлетворенности клиентов в компании внедрена система CRM (Customer relationship management)», которая способствует увеличению скорости работы сотрудников и, благодаря возможности получать обратную связь от клиентов, оперативному реагированию на предложения или замечания. ПАО «НЛМК» внедряет цифровые решения по планированию производства, которые позволяют клиентам отслеживать состояние заказа в режиме реального времени, что «повышает точность выпол-

² Долгосрочная стратегия 2030 // Свеза. URL: <https://sveza.ru/company/strategy/>

³ Клиентоориентированность // ТМК. URL: https://www.tmk-group.ru/Customer_priorities

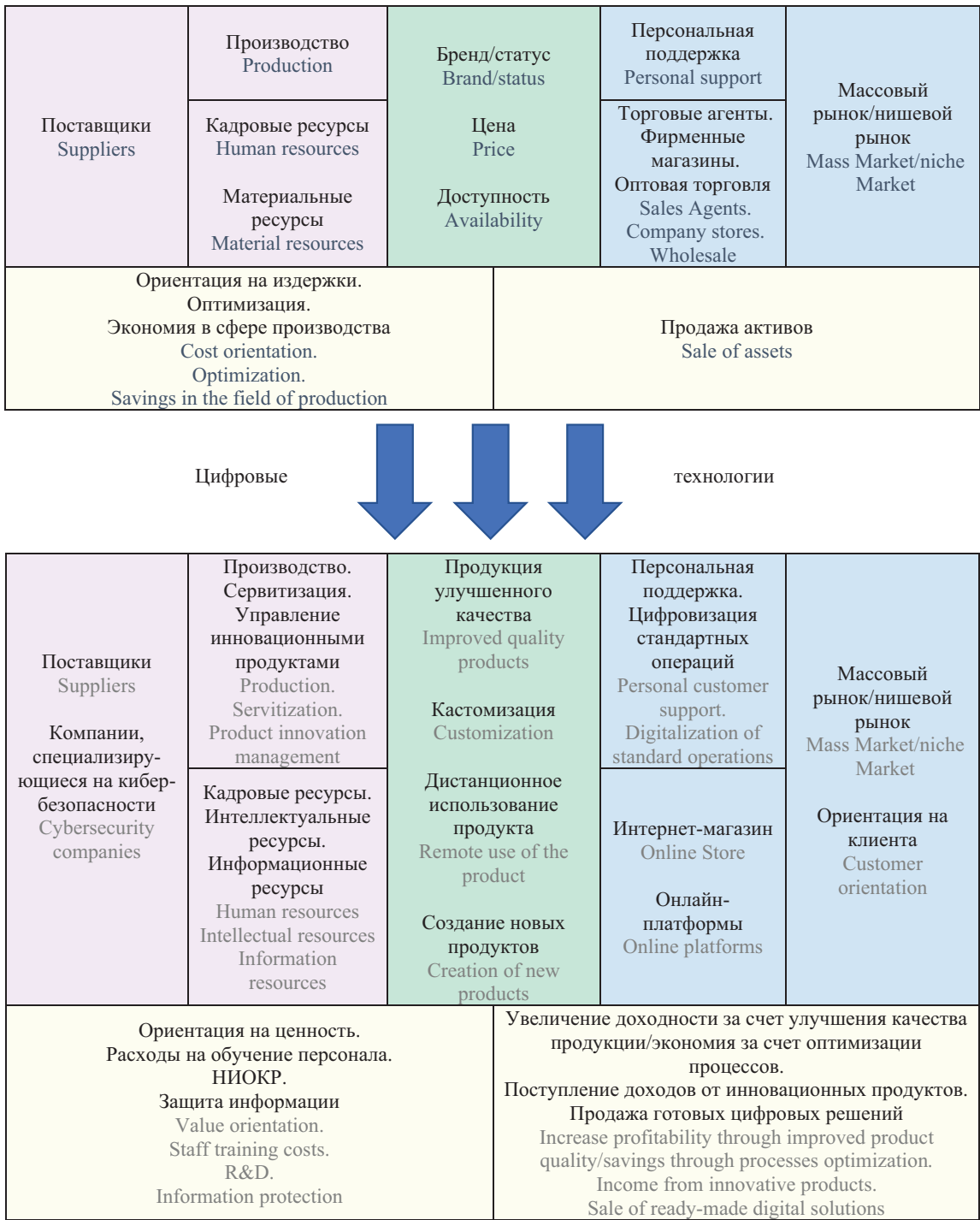


Рис. 2. Цифровая трансформация бизнес-модели промышленных предприятий строительной индустрии
Fig. 2. Digital transformation of the business model of construction industry enterprises

нения заказа клиентов и обеспечивает прозрачность их отслеживания»⁴.

2. Взаимодействие с клиентами

Тип взаимодействия с клиентами на ППСИ, не внедряющих ЦТ, это, как правило, персональная

поддержка через персонального менеджера компании. Такой же тип характеризует и цифровизированные предприятия, но с существенными отличиями:

- более тесное взаимодействие с клиентами:

такого мнения придерживаются отечественные и зарубежные исследователи. Так, Mari Elizabeth Foley [13] считает «более тесное взаимодействие с клиентами ключевым аспектом Индустрии 4.0»: более гибкая цепочка создания ценности способствует непосредственному и более близкому клиентскому сервису.

⁴ НЛМК повысит точность выполнения заказов за счет внедрения цифровой платформы планирования производства // НЛМК. URL: <https://nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-to-boost-order-accuracy-using-digital-production-planning/>

М.Ю. Гордеев и др. считают, что «в сфере работы с потребителем искусственный интеллект может быть использован... для распознавания образов клиентов и передачи им специализированных предложений» [18]. Такое обслуживание не становится особым персональным в полном его понимании, но при этом подразумеваются более близкие контакты, чем при простом персональном обслуживании за счет предугадывания потребностей клиента с помощью ЦТ;

• *цифровизация стандартных операций:*

М.Ю. Гордеев и соавт. [18] в своей статье говорят о значимости внедрения технологии ИИ в сфере работы с клиентами в качестве интеллектуальных ассистентов и чат-ботов, что может помочь клиентам в выполнении различных операций.

Практика внедрения виртуальных ассистентов на ППСИ уже существует: ПАО «НЛМК» интегрировало в корпоративный сайт «виртуального ассистента» в формате чат-бота. Цифровой сервис «в онлайн-режиме отвечает поставщикам на вопросы по участию в закупочных процедурах, заполнению анкет, устранению технических проблем, работе в личном кабинете, ... статусу платежей»⁵.

3. Каналы сбыта

Цифровизация пока не отменяет традиционные каналы сбыта, такие как фирменные магазины, оптовую торговлю, торговых представителей, но при этом привносит новизну — появление интернет-магазинов и платформ онлайн-продаж. М. Foley [13] в своей диссертационной работе делает неожиданное для нее открытие, что конкуренты могут начать продавать онлайн. При этом «команды руководителей готовы полностью изменить канал выхода на рынок, как только их конкуренты сделают первый шаг» [13]. Для поддержания этого нового канала выхода на рынок «производственные процессы должны стать более эффективными за счет использования цифровых инструментов, таких как Интернет вещей, объединяющий оборудование для получения информации, необходимой для более быстрого принятия решений» [13].

Работа по созданию платформ онлайн-продаж среди отечественных ППСИ уже идет: ПАО «Северсталь» создала две платформы для взаимодействия заказчик – продавец:

1) Cometal (Metal Processing Hub) — «платформа, объединяющая производственные мощности металлообрабатывающих и машиностроительных предприятий для заказа любых видов металла в один клик»⁵. На платформе зарегистрированы уже более 170 производственных партнеров, готовых к выполнению заказов. ПАО «Северсталь» при осуществлении сделки на онлайн-платформе является гарантом для заказчиков и поставщиков, «берет на себя поиск исполнителей, маршрутизацию заявок клиентов

и контроль исполнения, а также сервисы по логистике»⁵;

2) Industrial Market — «платформа для закупочной деятельности промышленных компаний, в категории tail spend»⁶. Затраты типа «tail spend» — это, как правило, «разовые и/или малоценные закупки»⁷. Платформа Industrial Market дает следующие преимущества для участников:

- упрощение документооборота;
- автоматизированный контроль закупки;
- сокращение транзакционных издержек в процессе закупки малоценных товаров;
- для клиента — гарантию надежности поставщиков;
- для поставщика — расширение клиентской базы и отсутствие бюрократии при совершении сделки с крупной корпорацией⁵.

ПАО «ТМК» применил новое бизнес-решение, которое оказывает влияние на экологию и создало онлайн-площадку для реализации невостребованной продукции — металлолома. «Грамотная переработка металлолома способствует не только очищению природы, но и упрощению производственных процессов, а также получению дополнительной прибыли», — отмечают в ПАО «ТМК»⁸. Сбыт неликвидной продукции на площадке происходит в формате аукциона.

Сфера «Предложение»

4. Ценностное предложение

Ценностное предложение ППСИ, внедряющих ЦТ, может отличаться от традиционного предложения по следующим параметрам:

- *продукция улучшенного качества:* компании, использующие ЦТ, предлагают своим клиентам наиболее качественный продукт. Практических примеров такого применения ЦТ много: ПАО «Северсталь» использует нейронную сеть EVE, являющуюся собственной разработкой компании, для обнаружения поверхностных дефектов металлопроката (она находит в три раза больше реальных дефектов в сравнении со своим зарубежным аналогом)⁹. Группа компаний «Свеза» для фиксации минимальных дефектов продукции применяет машинное зрение¹⁰. ПАО «ТМК» внедрило технологию «цифровых двойников прокатных станов на трубных заводах, ... что позволяет выбрать и апробировать настройки оборудования

⁶ Industrial Market. URL: <https://industrial.market/>

⁷ Рубим «хвосты» в затратах на закупки. URL: <https://bid-zaar.com/start/low-cost/>

⁸ Реализация неликвидной продукции ПАО «ТМК». URL: <https://stock.tmk-group.com>

⁹ «Северсталь» внедряет нейронные сети для повышения качества металлопроката. URL: <https://severstal.com/rus/media/archive/2019-12-25-severstal-vnedryaet-neyronnye-seti-dlya-povysheniya-kachestva-metalloprokata>

¹⁰ Долгосрочная стратегия 2030 // Свеза. URL: <https://sveza.ru/company/strategy/>

⁵ Cometal. URL: <https://mph.severstal.com/>

ния в виртуальной среде, а затем применить на производстве наиболее эффективный вариант»¹¹;

- *изготовление на заказ (кастомизация)*: высокий уровень кастомизации может быть достигнут за счет использования технологий 3D-печати (аддитивных технологий). J. Savolainen и соавт. [19] рассматривают влияние технологий 3D-печати не на конкретную отрасль, а в целом, и приходят к выводу, что они являются «дополняющими технологиями... и экономический потенциал аддитивных технологий по-прежнему основан на концептуальных исследованиях, которые на момент написания статьи не имеют экономической реальности», отмечая при этом высокий уровень кастомизации при внедрении аддитивных технологий. В России начало внедрения технологий 3D-печати в строительной сфере уже положено: например, Группа компаний «АМТ-Спецавиа» занимается «разработкой и производством 3D-строительных принтеров, продаж и сервисным обслуживанием»¹²;

- *дистанционное использование продукта*: о возможности изменения ценностного продукта за счет внедрения ЦТ пишет М.Ю. Гордеев и соавт. [18]. Авторы считают, что это достигается путем применения «технологии виртуальной и дополненной реальности», в результате чего у потребителя появляется «возможность дистанционного использования продукта при совершении покупки» [18]. Однако данных о практической реализации такого изменения ценностного предложения среди отечественных ППСИ пока нет;

- *создание новых продуктов*: применение ЦТ дает толчок к созданию принципиально новых цифровых продуктов: хорошим примером являются две платформы онлайн-продаж, созданные ПАО «Северсталь»⁹, о которых шла речь в блоке 3 «Каналы сбыта». Онлайн-платформы являются абсолютно новым продуктом для предприятия, которое, кроме дополнения к основной деятельности — производству стали и металлоконструкций, становится оператором платформы онлайн-продаж.

Сфера «Инфраструктура»

5. Ключевые партнеры

В блоке ключевых партнеров при внедрении ЦТ не ожидается существенных изменений — поставщики по-прежнему будут играть главенствующую роль. Однако при цифровизации предприятий увеличивается объем используемой информации, что влечет за собой значительный рост значимости кибербезопасности. Порой даже промышленные гиганты не способны обеспечить сохранность и должную за-

щиту информации: представитель ПАО «ТМК» отмечает «тенденцию к развитию крупными компаниями собственных компетенций по кибербезопасности»¹³, обозначая при этом сохраняющуюся актуальность привлечения для этих целей специализированных компаний.

6. Ключевые виды деятельности

Производство, несомненно, остается ключевым видом деятельности, но цифровизация привносит новшество и в этот блок бизнес-модели. Практика показывает, что с внедрением цифровых технологий у ППСИ могут появляться новые виды деятельности, например, такие, как управление инновационными продуктами. Платформы онлайн-продаж, созданные ПАО «Северсталь» (Commetal⁵ и Industrial Market⁶), о которых упоминалось в блоке «Каналы сбыта», хорошо иллюстрируют появление таких инновационных видов деятельности.

Mari Elizabeth Foley [13] говорит о том, что один из трех основных аспектов Индустрии 4.0 — «это перепроектирование продуктов и услуг путем внедрения технологий для отслеживания того, как они используются и работают, что дает возможность предложить клиентам, например, заказать новую деталь или продукт, когда их срок годности истечет». S. Krauss [21], обсуждая преимущества «умных фабрик», упоминает подключение интеллектуальных машин к системам управления для автоматического обмена информацией. Конкретизируя, автор говорит о возможности подключить датчики, которые уже были установлены на действующее оборудование, к IoT для совместной работы. S. Krauss [21] прогнозирует, что «в будущем будет все больше приложений для Интернета вещей, которые будут выходить за рамки изготовления самого продукта. Продукты должны будут передавать и ретранслировать информацию в режиме реального времени» [21]. В описанных случаях речь идет о сервитизации (постпродажном обслуживании).

Единое определение термина «сервитизация» в российской научной литературе отсутствует. Наиболее подходящим авторы считают определение, данное А. Ruiz-Martín и соавт. [22]: «сервитизация — это когда производственные фирмы предоставляют своим клиентам широкий спектр продуктов и услуг с целью повышения их потребительской ценности и опыта». Возможности для развития сервитизации у ППСИ с появлением ЦТ значительно расширились: так, ПАО «Северсталь» на основании данных, получаемых с датчиков на промышленном оборудовании (IoT), планирует «реализовать проекты по предиктивной аналитике в таких сферах, как предиктивные ремонты оборудования, оптимизация качества

¹¹ ТМК получила прибыль в размере полмиллиарда рублей от внедрения цифровых двойников. URL: <https://www.tmk-group.ru/PressReleases/3606>

¹² АМТ-Спецавиа — первый серийный производитель 3D-принтеров для строительства домов. URL: <https://specavia.pro/about/>

¹³ ТМК представила собственные IT-решения на II Международном IT-форуме металлургической отрасли Smart Mining & Metals. URL: <https://www.tmk-group.ru/PressReleases/4181>

производимой продукции и других, где возможно и экономически оправданно применение искусственного интеллекта»¹⁴. Для хранения такого количества данных ПАО «Северсталь» создало «крупнейшее среди промышленных компаний России Data Lake», т.е. репозиторий для аккумулирования и хранения информации. Говоря о Data Lake ПАО «Северсталь», мы плавно переходим к следующему блоку — Ключевые ресурсы.

7. Ключевые ресурсы

Увеличивающийся объем используемой информации при внедрении цифровых технологий делает информацию одним из ключевых ресурсов наравне с кадровыми и материальными. Информация требует пристального внимания: она требует хранения, надлежащей защиты, является основой смежных ЦТ, таких, как машинное обучение и искусственный интеллект. Технология Data Lake, используемая для хранения информации в одном месте, в России распространяется все шире: среди ППСИ, кроме ПАО «Северсталь»⁹, о его значимости в цифровой модели управления также заявляет представитель лесопромышленного холдинга Segezha Group.

Первостепенное значение в «оцифрованном» производстве приобретает интеллектуальный ресурс. Единое определение этого термина отсутствует, наиболее подходящим авторы считают следующее: «это система отношений, складывающаяся с целью развития интеллектуальной активности индивида (коллектива, общества), в процессе его интеллектуальной деятельности, направленной на производство новейших знаний, для обеспечения устойчивого экономического роста в интересах повышения качества жизни всего населения» [23]. Осознавая значимость интеллектуальных ресурсов, ППСИ развивают их в различных направлениях. Так, ПАО «Северсталь» внедрила в работу предприятия «Фабрику идей», в рамках которой все сотрудники могут предлагать идеи и помогать с реализацией «предложений, направленных на оптимизацию бизнес-процессов, снижение потерь, повышение качества, улучшение безопасности и условий труда»¹⁵. За предложения, принятые к реализации, сотрудники получают поощрения. По данным за 2020 г. в Фабрику идей были вовлечены 54 % сотрудников. Группа компаний «Свеза» инвестирует «в производство, НИОКР и обучение персонала»².

Также стоит отметить ПАО «ТМК», которое для стимулирования интеллектуальных ресурсов запустило «общекорпоративную платформу для обучения и развития SOTA2U, ... которая позволяет всем сотрудникам ТМК использовать базу знаний ком-

пании и проходить обучение и оценку компетенций из любой точки мира при наличии доступа в Интернет». На ноябрь 2020 г. на платформе уже было более 55 тыс. участников¹⁶.

Сфера «Финансовая эффективность компании»

8. Потоки поступления доходов

Основным потоком поступления доходов как до, так и после цифровизации предприятия остается продажа активов, но за счет внедрения ЦТ отмечается *увеличение доходности за счет улучшения качества продукции и экономия за счет оптимизации процессов*. ПАО «ТМК» сообщило о получении дополнительной прибыли в размере около 500 млн руб. «от внедрения цифровых двойников прокатных станов трубных заводов». Отмечается, что «экономический эффект был достигнут за счет повышения качества трубной продукции, выпуска труб из новых марок стали и снижения издержек». Группа НЛМК сообщила о ежегодной экономии в 100 млн руб. за счет внедрения сервиса «Гефест», который системно планирует «перемещение ковшей с жидким металлом по цеху, чтобы не допустить излишнего остывания металла и связанных с этим дополнительных затрат при выполнении плана производства»¹⁷. ПАО «НЛМК» удалось «на 20–40 % уменьшить операционные затраты на процесс закупки... за счет внедрения системы управления закупками SAP Ariba Sourcing для повышения эффективности выбора и приобретения оборудования»¹⁸.

Кроме увеличения доходности от традиционной деятельности предприятия, ЦТ могут способствовать появлению новых потоков поступления доходов, например:

- *поступление доходов от инновационных продуктов*. Уже упоминавшийся ранее в блоке 3 «Каналы сбыта» кейс ПАО «Северсталь» о создании электронных торговых площадок⁹ является для организации новым источником дохода;
- *продажа готовых цифровых решений*. На данном этапе отсутствуют примеры практической реализации такого способа получения доходов среди ППСИ. Однако, по мнению авторов, сложившаяся на сегодняшний день геополитическая обстановка в мире, санкции, введенные против России и некоторых отечественных предприятий, и отказ ряда зарубежных компаний работать с российскими партнерами способствуют тому, что компании, которым нерентабельно проектировать собственные цифровые решения, бу-

¹⁴ «Северсталь» создает крупнейшее среди промышленных компаний России Data Lake. URL: <https://severstal.com/rus/media/archive/2017-08-02-severstal-sozdaet-krupneyshee-sredi-promyshlennykh-kompaniy-rossii-data-lake/>

¹⁵ Управление инновациями. URL: <https://severstal.com/rus/sustainable-development/research-innovation/>

¹⁶ Корпоративный университет ТМК2U признан лидером в области цифровой трансформации на конкурсе «Создавая будущее». URL: <https://www.tmk-group.ru/PressReleases/398>

¹⁷ Группа НЛМК — победитель Rusbase Digital Awards 2021. URL: <https://nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-group-tops-rusbase-digital-awards-2021/>

¹⁸ НЛМК внедрил цифровое решение для управления закупками оборудования. URL: <https://nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-group-at-startup-village-2021/>

дуют покупать готовые у тех отечественных компаний, которые их уже разработали и внедрили ранее, с последующей адаптацией их под собственные нужды и особенности.

9. Структура издержек

Под влиянием цифровизации возможно появление новых издержек в деятельности ППСИ, поскольку внедрение ЦТ подразумевает приобретение или разработку новых технологий, финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), а также приобретение необходимого программного обеспечения и баз данных, следовательно, приведет к увеличению доли нематериальных активов ППСИ. Для понимания изменений, происходящих в структуре издержек ППСИ, внедряющих технологии цифровой экономики, была проанализирована бухгалтерская (финансовая) отчетность и аудиторские заключения о бухгалтерской (финансовой) отчетности нескольких ППСИ^{19, 20, 21, 22}, в структуру которых входят нематериальные активы (НМА). По результатам проведенного анализа были

подготовлены графические материалы, содержащие данные о величине и структуре НМА ППСИ: на рис. 3 представлена информация об изменении стоимости НМА анализируемых ППСИ, на рис. 4 — сведения об изменении доли стоимости НМА (в том числе НИОКР) в общей стоимости активов предприятий, на рис. 5 — информация о структуре НМА по группам. Анализ проведен с момента начала открытой публикации соответствующей отчетности в сети Интернет по текущий период (2018–2023 гг.).

Абсолютная стоимость НМА проанализированных ППСИ показывает стабильный рост за прошедшие шесть лет за небольшими исключениями: снижение наблюдалось лишь у ПАО «НЛМК» в 2020 г. (на 17 %), а также незначительное снижение (3 %) у ПАО «ММК» в 2021 г. Стоимость НМА ПАО «Северсталь» и ПАО «ТМК» была кратно увеличена за рассматриваемый период (в 8,5 и 5,9 раз соответственно).

Доля НМА составляет менее 1 % от общей стоимости активов ППСИ, однако у двух из четырех предприятий (ПАО «Северсталь», ПАО «ТМК») прослеживается тенденция на ежегодное увеличение доли расходов на НМА. Доля НМА в структуре затрат ПАО «НЛМК» снижалась до 2020 г., а в период с 2021 по 2023 г. доля нематериальных расходов начала увеличиваться. Доля НМА ПАО «ММК» показала значительное снижение в общей структуре затрат в период 2020–2022 г., а за 2023 г. доля НМА была увеличена.

Анализ аудиторских заключений о бухгалтерской (финансовой) отчетности структуры расходов на НМА ППСИ показал отсутствие единообразия в предоставлении информации о НМА: на практике лишь стоимость НИОКР выделяется отдельной ста-

¹⁹ Интерфакс — сервер раскрытия информации. ПАО «НЛМК». URL: <https://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=2509&type=3>
²⁰ Интерфакс — сервер раскрытия информации. ПАО «Северсталь». URL: <https://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=30&type=3>
²¹ Интерфакс — сервер раскрытия информации. ПАО «ТМК». URL: <https://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=274&type=3>
²² Интерфакс — сервер раскрытия информации. ПАО «ММК». URL: <https://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=9&type=3>

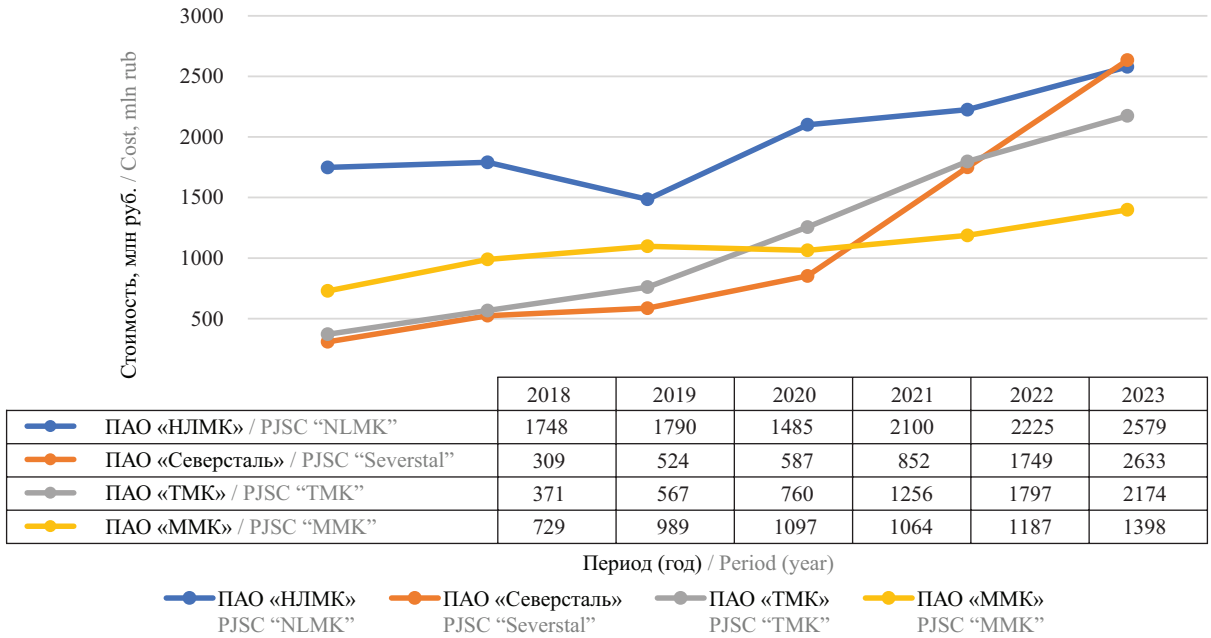


Рис. 3. Стоимость нематериальных активов ППСИ

Fig. 3. The value of intangible assets of construction industry enterprises

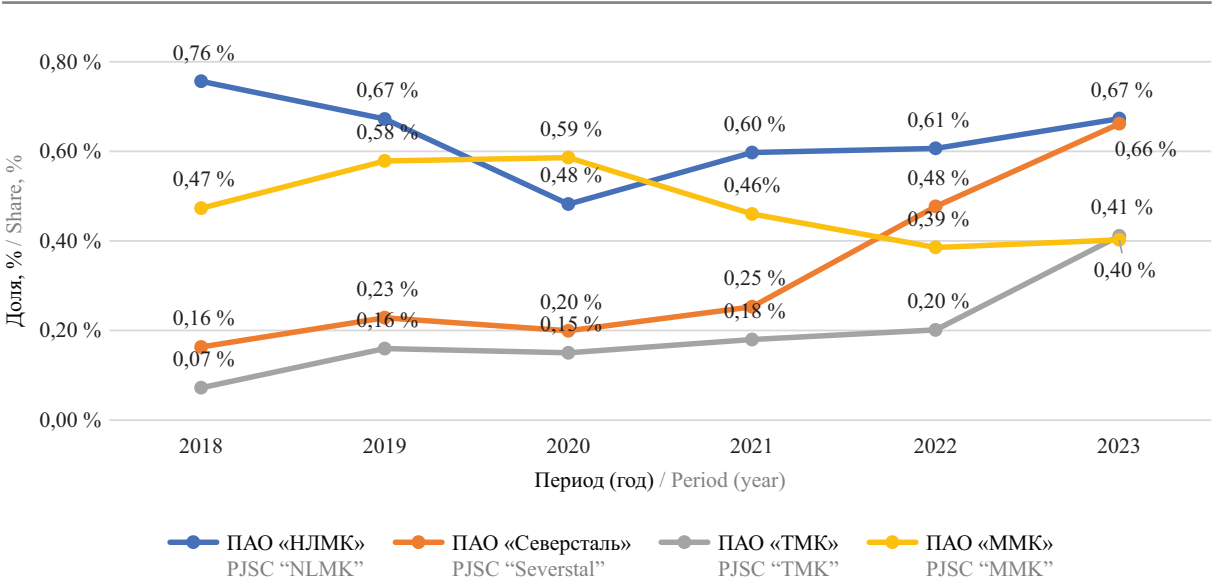
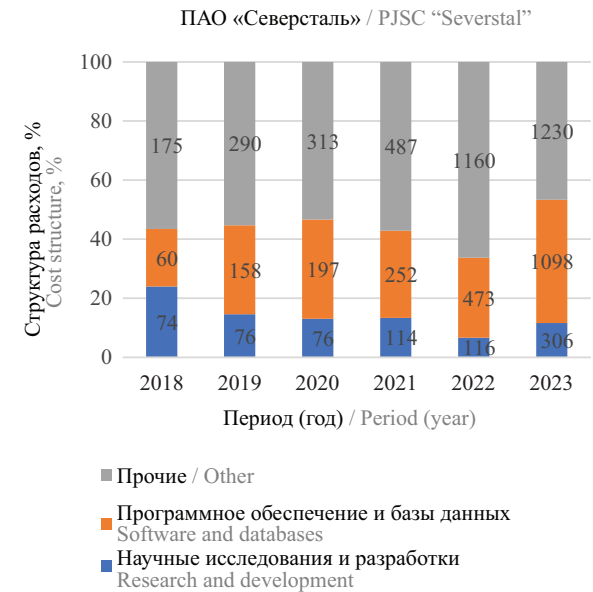
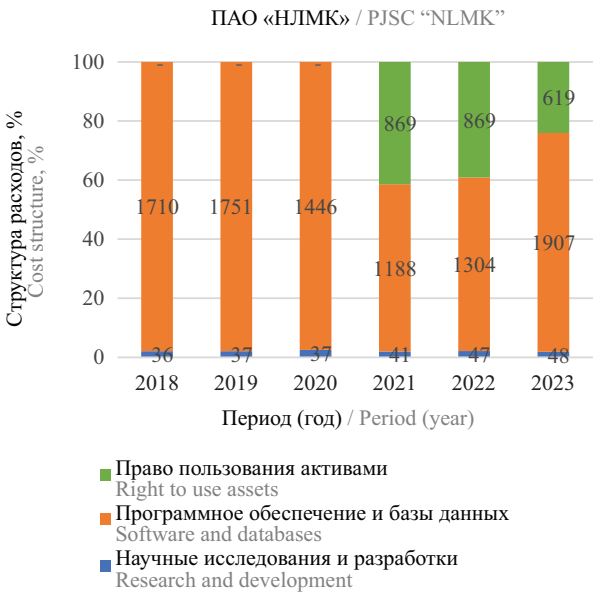


Рис. 4. Доля стоимости нематериальных активов (в том числе НИОКР) в общей стоимости активов ППСИ
Fig. 4. The share of the value of intangible assets (including R&D) in the total value of construction industry enterprises assets

тей на всех исследуемых ППСИ, а остальные статьи в структуре нематериальных активов индивидуализированы. Анализ стоимости НИОКР показал, что, несмотря на практический ежегодный рост расходов на НИОКР, их доля в структуре расходов на НМА за прошедшее время остается неизменной либо уменьшается. В ПАО «НЛМК» стоимость НИОКР составила лишь около 2–2,5 %, в то время как в период 2018–2020 г. около 98 % стоимости НМА составила стоимость программного обеспечения и баз данных, а в период 2021–2023 г. значительную часть расходов (25–40 %) составило право пользования активами (с большой долей вероятностью это следствие невысокого уровня затрат на НИОКР), при этом данный период также характеризуется ростом затрат на программное обеспечение и базы данных. Доля НИОКР в структуре затрат НМА ПАО «Северсталь»

за рассматриваемый период колеблется от 12 до 24 % с тенденцией к снижению, при этом в последний год анализируемого периода более чем в 2 раза была увеличена стоимость программного обеспечения и баз данных и составила более 40 % затрат на НМА. В отчетах ПАО «ТМК» и ПАО «ММК» стоимость программного обеспечения и баз данных в структуре НМА не выделена. В структуре НМА ПАО «ТМК» прослеживается увеличение доли затрат на патенты и ноу-хау при одновременном снижении доли затрат на товарные знаки. Анализ структуры затрат НМА ПАО «ММК» не выявил характерных особенностей ее изменений за рассмотренный период.

Анализ бухгалтерской (финансовой) отчетности ППСИ, внедряющих ЦТ, показал рост абсолютных затрат на НМА и кратное увеличение доли затрат на НМА в структуре их активов на двух из четырех



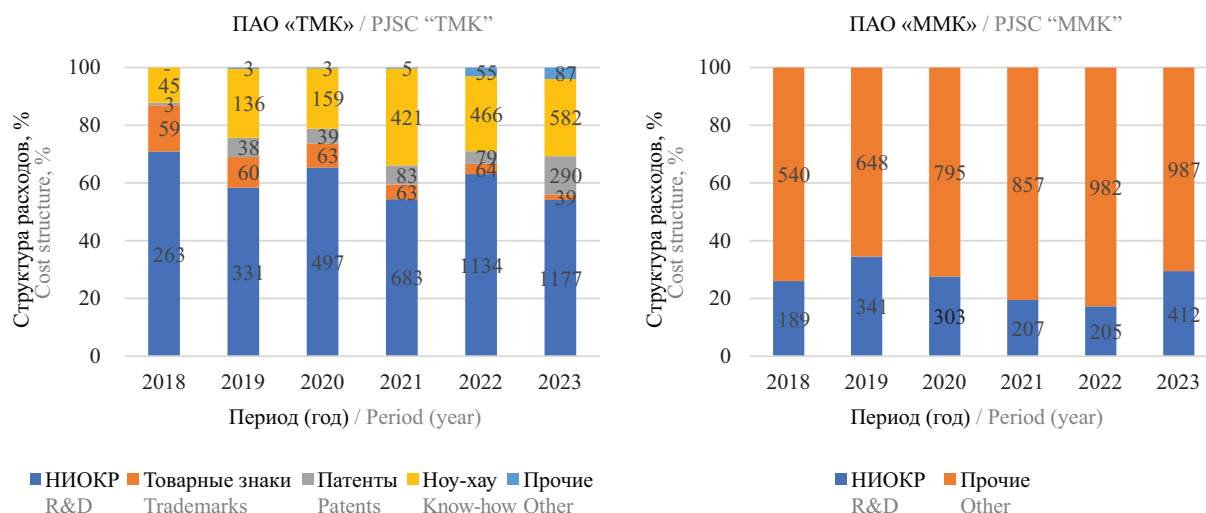


Рис. 5. Структура нематериальных расходов ППСИ (абсолютные значения на диаграммах приведены в млн руб.)

Fig. 5. The structure of intangible expenses of construction industry enterprises (absolute values in the diagrams are given in millions of rubles)

исследуемых ППСИ, на двух других — незначительное снижение за исследуемый период с тенденцией к увеличению за последние годы. Анализ структуры затрат на НМА продемонстрировал сохранение доли НИОКР в структуре затрат на НМА (при этом в абсолютных значениях затраты на НИОКР на всех ППСИ демонстрируют стабильный рост), а при невысоком уровне затрат на НИОКР выявлен рост затрат на право пользования активами, увеличение затрат за рассматриваемый период на программное обеспечение и базы данных, а также на патенты и ноу-хау.

Кроме того, отметим, что при внедрении ЦТ будут увеличены расходы на обучение персонала и защиту информации от киберугроз, а также произойдет смещение акцента с традиционной для ППСИ ориентации на издержки с оптимизацией и экономией в сфере производства на ориентацию на ценность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ влияния ЦТ на бизнес-модели ППСИ показывает, что процесс цифровизации оказывает влияние на все сферы и блоки бизнес-модели. Некоторые новшества проявляются только в небольших деталях: так, например, блок «Потребительский сегмент» практически не изменится, целевой аудиторией по-прежнему остается массовый либо нишевой рынок, в зависимости от того, какая аудитория была до цифровизации. Блок «Ключевые виды деятельности» также не подвержен кардинальным изменениям, основным видом деятельности у ППСИ останется производство, но оно может быть дополнительно сервитизацией либо управлением инновационными продуктами. Но часть нововведений может сильно изменить устоявшиеся парадигмы: привычные каналы сбыта, такие как фирменные магазины и оптовая торговля, со временем могут быть вытеснены цифровыми ресурсами: интернет-магазинами и онлайн-

платформами, такой вывод делается на основании тенденций роста популярности онлайн-покупок²³. Также значительным изменениям под действием цифровизации могут подвергнуться сферы «Предложение» и «Финансовая эффективность компании».

При внедрении новых технологий, систем, продуктов всегда существует риск отрицательного результата, но отказ от цифровых новшеств — это еще больший риск для предприятий, ведь невнедрение может повлечь резкое снижение конкурентоспособности, значительное отставание от технологий, и, как следствие, снижение доходности и потерю клиентов. Как отметил президент Группы НЛМК Григорий Федоришин: «...Цифровая трансформация бывает успешной, если является инструментом достижения стратегических целей, а не самоцелью. Изменения, связанные с цифровизацией, должны носить системный характер. Поэтому концентрироваться нужно... на изменении процессов компании на всех уровнях»²⁴. Именно комплексное рассмотрение всех изменений бизнес-модели, появляющихся под влиянием цифровизации, будет способствовать успешному внедрению ЦТ.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы и внедрены в практическую деятельность промышленными предприятиями строительной индустрии, занимающимися цифровизацией своей деятельности в части внесения актуальных изменений в существующие бизнес-модели таких предприятий.

²³ Аналитики описали портрет типичного покупателя интернет-магазина. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/10/10/2021/61618e229a7947975cf67c04

²⁴ Группа НЛМК на конференции Startup Village-2021. URL: <https://nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-group-at-startup-village-2021/>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Остервальдер А., Пинье И.* Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора. М. : Альпина Паблишер, 2012. 255 с.
2. *Bencsik B., Palmié M., Parida V., Wincent J., Gassmann O.* Business models for digital sustainability: Framework, microfoundations of value capture, and empirical evidence from 130 smart city services // *Journal of Business Research*. 2023. Vol. 160. P. 113757. DOI: 10.1016/j.jbusres.2023.113757
3. *Eigner A., Sary C.* The Role of Internet-of-Things for Service Transformation // *Sage Open*. 2023. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.1177/21582440231159281
4. *Kohtamäki M., Parida V., Oghazi P., Gebauer H., Baines T.* Digital servitization business models in ecosystems: A theory of the firm // *Journal of Business Research*. 2019. Vol. 104. Pp. 380–392. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.06.027
5. *Le-Dain M.-A., Benhayoun L., Matthews J., Liard M.* Barriers and opportunities of digital servitization for SMEs: the effect of smart Product-Service System business models // *Service Business*. 2023. Vol. 17. Issue 1. Pp. 359–393. DOI: 10.1007/s11628-023-00520-4
6. *Paiola M., Schiavone F., Grandinetti R., Chen J.* Digital servitization and sustainability through networking: Some evidences from IoT-based business models // *Journal of Business Research*. 2021. Vol. 132. Pp. 507–516. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.04.047
7. *Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Усманов Д.И.* Ключевые тенденции и закономерности развития цифровых бизнес-моделей банковских сервисов в Индустрии 4.0 // *Финансы: теория и практика*. 2021. Т. 25. № 5. С. 59–78. DOI: 10.26794/2587-5671-2021-25-5-59-78. EDN LZWGPX.
8. *Замбалаева Т.Б.* Трансформация бизнес-моделей платформенных компаний // *Вестник Омского университета*. Серия: Экономика. 2021. Т. 19. № 1. С. 70–77. DOI: 10.24147/1812-3988.2021.19(1).70-77. EDN CWXQJJ.
9. *Куликова Д.С.* Цифровизация бизнес-моделей: глобальные тренды и перспективы развития // *Инновации и инвестиции*. 2022. № 4. С. 54–58. EDN OLGFE.
10. *Долгова О.И., Никитаева А.Ю.* Инновации бизнес-моделей: цифровизация, сервитизация и кастомизация в деятельности промышленных компаний // *Дружковский вестник*. 2021. № 6 (44). С. 4–16. DOI: 10.17213/2312-6469-2021-6-4-16. EDN XJYKPP.
11. *Suppatvech C., Godsell J., Day S.* The roles of Internet of things technology in enabling servitized business models : a systematic literature review // *Industrial Marketing Management*. 2019. Vol. 82. Pp. 70–86. DOI: 10.1016/j.indmarman.2019.02.016
12. *Eigner A., Sary Ch.* The Role of Internet-of-Things for Service Transformation // *Sage Open*. 2023. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.1177/21582440231159281
13. *Kane G., Palmer D., Phillips A.N., Kiron D.* Is your business ready for a digital future? // *MIT Sloan Management Review*. 2015. Vol. 56. Issue 4. Pp. 37–44.
14. *Foley M.E.* Digital disruption: exploring effects on the manufacturing environment : dis. ... doctor of business administration. Capella University, 2020.
15. *Мрочковский Н.С., Ляндау Ю.В., Пушкин И.С., Кривоногов Е.А.* Основные тенденции цифровой трансформации бизнеса // *Экономика и предпринимательство*. 2019. № 4 (105). С. 89–91. EDN SAKGAJ.
16. *Muller J.M., Buliga O., Voigt K.-I.* Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0 // *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 132. Pp. 2–17. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.12.019
17. *Олифирова А.В., Маковейчук К.А., Петренко С.А.* Трансформация бизнес-моделей в условиях цифровой экономики // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Т. 7. № 4. С. 85–91. EDN KWLQKR.
18. *Гордеев М.Ю., Фатьянов Я.И., Скоробогатова А.С., Байскова Н.П.* Влияние сквозных технологий на элементы канвы бизнес-модели // *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2019. № 8. С. 53–56. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11110. EDN HKXBCY.
19. *Weill P., Woerner S.* Thriving in an increasingly digital ecosystem // *MIT Sloan Management Review*. 2015. Vol. 56. Issue 4. Pp. 27–34.
20. *Savolainen J., Collan M.* How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models? — Review of Literature // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 32. P. 101070. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101070
21. *Krauss S.* Smart factories: the factories of the future // *Manufacturing Business Today*. 2017.
22. *Ruiz-Martín A., Díaz-Garrido E.* A review of servitization theoretical foundations // *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2021. Vol. 14. Issue 3. P. 496. DOI: 10.3926/jiem.3466
23. *Головчанская Е.Э.* Основные смысловые аспекты понятия «интеллектуальные ресурсы» // *Современность и наследие: экономические, образовательные и социально-культурные аспекты развития России : сб. науч. тр. по мат. I Междунар. науч.-практ. конф.* 2014. С. 229. EDN TVSOBB.

Поступила в редакцию 25 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Анна Романовна Булина — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1138428, ORCID: 0000-0002-9437-9255; mochalova.anna@mail.ru;

Наталья Анатольевна Солопова — доктор экономических наук, профессор кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 459031, Scopus: 57193075378, ResearcherID: N-8850-2016, ORCID: 0000-0003-2034-4321; ushanovan@mail.ru.

Вклад авторов:

Булина А.Р. — идея, концепция исследования, сбор и обработка материала, написание основной части статьи (материалы и методы, результаты исследования).

Солопова Н.А. — подготовка введения, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Osterwalder A., Pigneur I. *Business Model Generation. A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. Moscow, Alpina Publisher, 2012; 255. (rus.).
2. Bencsik B., Palmié M., Parida V., Wincent J., Gassmann O. Business models for digital sustainability: Framework, microfoundations of value capture, and empirical evidence from 130 smart city services. *Journal of Business Research*. 2023; 160:113757. DOI: 10.1016/j.jbusres.2023.113757
3. Eigner A., Stary C. The Role of Internet-of-Things for Service Transformation. *Sage Open*. 2023; 13(1). DOI: 10.1177/21582440231159281
4. Kohtamäki M., Parida V., Oghazi P., Gebauer H., Baines T. Digital servitization business models in ecosystems: A theory of the firm. *Journal of Business Research*. 2019; 104:380-392. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.06.027
5. Le-Dain M.-A., Benhayoun L., Matthews J., Liard M. Barriers and opportunities of digital servitization for SMEs: the effect of smart Product-Service System business models. *Service Business*. 2023; 17(1):359-393. DOI: 10.1007/s11628-023-00520-4
6. Paiola M., Schiavone F., Grandinetti R., Chen J. Digital servitization and sustainability through networking: Some evidences from IoT-based business models. *Journal of Business Research*. 2021; 132:507-516. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.04.047
7. Dudin M.N., Shkodinskii S.V., Usmanov D.I. Key Trends and Regulations of the Development of Digital Business Models of Banking services in Industry 4.0. *Finance: Theory and Practice*. 2021; 25(5):59-78. DOI: 10.26794/2587-5671-2021-25-5-59-78. EDN LZWGPX. (rus.).
8. Zambalaeва T.B. Transforming business models of the platform companies. *Herald of Omsk University. Series Economics*. 2021; 19(1):70-77. DOI: 10.24147/1812-3988.2021.19(1).70-77. EDN CWXQJJ. (rus.).
9. Kulikova D.S. Digitalization of business models: global trends and development prospects. *Innovation & Investment*. 2022; 4:54-58. EDN OLGFEZ. (rus.).
10. Dolgova O.Ig., Nikitaeva A.Yu. Business model innovations: digitalization, servitization and customization of industrial companies. *Drukerovskij vestnik*. 2021; 6(44):4-16. DOI: 10.17213/2312-6469-2021-6-4-16. EDN XJYKPP. (rus.).
11. Suppatvech C., Godsell J., Day S. The roles of Internet of things technology in enabling servitized business models : a systematic literature review. *Industrial Marketing Management*. 2019; 82:70-86. DOI: 10.1016/j.indmarman.2019.02.016
12. Eigner A., Stary Ch. The Role of Internet-of-Things for Service Transformation. *Sage Open*. 2023; 13(1). DOI: 10.1177/21582440231159281
13. Kane G., Palmer D., Phillips A.N., Kiron D. Is your business ready for a digital future? *MIT Sloan Management Review*. 2015; 56(4):37-44.
14. Foley M.E. *Digital disruption: exploring effects on the manufacturing environment : dis. ... doctor of business administration*. Capella University, 2020.
15. Mrochovsky N.S., Lyandau Yu.V., Pushkin I.S., Krivonogov Ye.A. Main tendencies of digital transformation of business. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2019; 4(105):89-91. EDN SAKGAJ. (rus.).
16. Muller J.M., Buliga O., Voigt K.-I. Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018; 132:2-17. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.12.019
17. Olifirov A.V., Makoveichuk K.A., Petrenko S.A. Transformation of business models in the digital economy. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019; 7(4):85-91. EDN KWLQKR. (rus.).
18. Gordeev M.Y., Fatyanov Y.I., Skorobogatova A.S., Bayskova N.P. Influence of through technologies on canvas elements business models. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2019; 8:53-56. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11110. EDN HKXBCY. (rus.).
19. Weill P., Woerner S. Thriving in an increasingly digital ecosystem. *MIT Sloan Management Review*. 2015; 56(4):27-34.

20. Savolainen J., Collan M. How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models? — Review of Literature. *Additive Manufacturing*. 2020; 32:101070. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101070

21. Krauss S. Smart factories: the factories of the future. *Manufacturing Business Today*. 2017.

22. Ruiz-Martín A., Díaz-Garrido E. A review of servitization theoretical foundations. *Journal of In-*

dustrial Engineering and Management. 2021; 14(3):496. DOI: 10.3926/jiem.3466

23. Golovchanskaya E.E. Basic semantic aspects of the concept of “intellectual resources”. *Modernity and heritage: economic, educational and socio-cultural aspects of Russia’s development : collection of scientific papers based on the materials of the I International scientific and practical conference*. 2014; 229. EDN TVSOBB. (rus.).

Received February 25, 2023.

Adopted in revised form on September 9, 2024.

Approved for publication on September 9, 2024.

B I O N O T E S: **Anna R. Bulina** — postgraduate of the Department of Management and Innovations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1138428, ORCID: 0000-0002-9437-9255; mochalova.anna@mail.ru;

Natalia A. Solopova — Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 459031, Scopus: 57193075378, ResearcherID: N-8850-2016, ORCID: 0000-0003-2034-4321; ushanovan@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anna R. Bulina — idea, conceptualization, data gathering and processing, writing of the main part of article (*Materials and methods and Results*).

Natalia A. Solopova — writing of the *Introduction and Conclusion*.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.133-144

Диссипативные структуры в системе управления отраслевыми научно-производственными комплексами

Сергей Борисович Сборщиков^{1,2}, Наталья Валериевна Лазарева^{1,2},
Дмитрий Михайлович Лейбман¹

¹ Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (ННТУ МИСИС);
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Многоплановость и амбициозность решаемых в настоящее время строительной отраслью задач указывают на необходимость нового трактования их постановки, особенно относительно обеспечения научного лидерства и технологического суверенитета. В подобной логике возможно рассматривать отраслевой научно-производственный комплекс (ОНПК) как систему с диссипативной организационной структурой. Приведено определение диссипативных организационных структур, указаны их свойства и место в организационно-экономическом механизме управления ОНПК. Проведенные исследования позволили показать перспективы применения диссипативных структур в системе управления строительством, сформулировать рекомендации по их формированию и функционированию.

Материалы и методы. Решение задач исследования предполагает системный подход к рассмотрению управления ОНПК, использование положений теорий жизненного цикла, логики регулирующих воздействий, а также методов структурно-функционального анализа, дедукции и индукции. Методологической основой, помимо указанных инструментов исследования, послужил научный задел, сформированный отечественными и зарубежными учеными по данной проблематике.

Результаты. Установлены особенности формирования и функционирования систем управления ОНПК, терминологически идентифицированы диссипативные организационные структуры, определены их свойства, а также возможности использования в системе ОНПК, даны базовые положения организационно-экономического механизма функционирования подобных комплексов на основе диссипативных структур, для которых детерминирована эффективность применения, показаны перспективы использования диссипативных структур в системе управления строительством, сформулированы рекомендации по их формированию и функционированию.

Выводы. Отраслевой научно-производственный комплекс можно рассматривать как систему с диссипативной организационной структурой. В данном случае основной акцент управления — это не поиск равновесия системы, а обеспечение развития во многом за счет ее самоорганизации. Подобное представление ОНПК будет способствовать повышению его результативности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диссипативные организационные структуры, когерентность, научно-производственный комплекс, технопарки, кластеры, бизнес-процессы, строительные организации, строительная отрасль, система управления, контроллинг, реинжиниринг, логистика регулирующих воздействий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В., Лейбман Д.М. Диссипативные структуры в системе управления отраслевыми научно-производственными комплексами // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 133–144. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.133-144

Автор, ответственный за переписку: Наталья Валериевна Лазарева, tous2004@mail.ru.

Dissipative structures in the management system of industrial research and production complexes

Sergej B. Sborshchikov^{1,2}, Natal'ya V. Lazareva^{1,2}, Dmitriy M. Lejbman¹

¹ Research Center of Construction; Moscow, Russian Federation;

² National University of Science and Technology "MISIS" (NUST MISIS); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The complexity and ambition of the tasks currently being solved by the construction industry indicate the need for a new interpretation of their formulation, especially with regard to ensuring scientific leadership and technological sovereignty. In this logic, it is possible to consider an industrial scientific and production complex as a system with a dissipative organizational structure. In this regard, the paper provides a definition of dissipative organizational structures, their properties and place in the organizational and economic mechanism of management of an industrial scientific and industrial complex are indicated. The conducted research made it possible to show the prospects for the use of dissipative structures in the construction management system, to formulate recommendations on their formation and functioning.

Materials and methods. The solution of the research tasks involves a systematic approach to the management of industrial scientific and industrial complexes, the use of life cycle theories, logistics of regulatory influences, as well as methods of structural and functional analysis, deduction and induction. The methodological basis, in addition to these research tools, is the scientific foundation formed by domestic and foreign scientists on this issue.

Results. The features of the formation and functioning of management systems of industrial scientific and industrial complexes are established, dissipative organizational structures are terminologically identified, their properties are determined, as well as the possibilities of use in the system of an industrial scientific and industrial complex, the basic provisions of the organizational and economic mechanism of functioning of such complexes based on dissipative structures for which the effectiveness of application is determined, the prospects for the use of dissipative structures in the construction management system, recommendations on their formation and functioning are formulated.

Conclusions. An industrial scientific and production complex can be considered as a system with a dissipative organizational structure. In this case, the main focus of management is not to find the balance of the system, but to ensure development largely due to its self-organization. Such a presentation of the industrial scientific and production complex will contribute to improving its effectiveness.

KEYWORDS: dissipative organizational structures, coherence, scientific and production complex, technoparks, clusters, business processes, construction organizations, construction industry, management system, controlling, reengineering, logistics of regulatory influences

FOR CITATION: Sborshchikov S.B., Lazareva N.V., Lejbman D.M. Dissipative structures in the management system of industrial research and production complexes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):133-144. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.133-144 (rus.).

Corresponding author: Natal'ya V. Lazareva, tous2004@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие национальной экономики и ее конкурентоспособность во многом определяются научно-техническим потенциалом, который в приложении коммерческого использования новых знаний и технологий формирует инновационный потенциал. Наличие научно-технического и инновационного потенциалов, их качественные и количественные характеристики напрямую связаны с глобальным научно-техническим прогрессом и национальной специализацией в нем.

Несмотря на смену технологического уклада, формирование постиндустриального общества с акцентом на развитие информационных технологий, значение производственных технологий реального сектора экономики не только сохраняется, но в современных условиях даже усиливается. Новые технологии (такие, например, как аддитивные, природоподобные) интегрированы с мульти-Д информационными технологиями, искусственным интеллектом. Корпоративные продуктовые новации создают собственные многоуровневые «умные» (смарт) системы (или экосистемы, пространства). Указанные тенденции полностью согласуются с развитием региональных и отраслевых составляющих национальной экономики [1–8].

«Умное» предприятие, «умный город» — это уже не только научные категории, но и перманентно развивающиеся методологии и практики. В подобной парадигме должны формироваться и развиваться научно-производственные комплексы (НПК) [9–14].

Научно-производственный комплекс — связанная система организаций или подразделений крупного объединения, ведущих как научную, так и производственную деятельность, характеризующаяся территориальной или отраслевой принадлежностью. В зависимости от решаемых задач и территориальности они могут быть отраслевыми (ОНПК) и регио-

нальными (РНПК). В обоих вариантах присутствует собственная иерархия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научный поиск базируется на проведенных ранее исследованиях авторов и является их логическим продолжением относительно логики регулирующих воздействий [15], реинжиниринга [16, 17], совершенствования научно-технической и инновационной деятельности на основе технопарковых структур [18], формирования корпоративных кластеров [19, 20], а также использования стратегического контроллинга в системе управления инвестиционно-строительной деятельностью на уровнях иерархии [21, 22].

Цель исследования — дать научное обоснование представления организации системы ОНПК как диссипативной структуры, установить перспективы подобного подхода, привести рекомендации его практического применения.

Целеполаганию соответствуют следующие задачи исследования:

1. Идентифицировать ОНПК, установить особенности формирования и функционирования его систем управления.
2. Определить свойства диссипативных структур, возможности их использования в системе ОНПК, представить описание базовых положений организационно-экономического механизма функционирования ОНПК на основе диссипативных структур.
3. Детерминировать эффективность применения диссипативных структур в рамках ОНПК.
4. Показать перспективы использования диссипативных структур в системе управления строительством (в том числе ОНПК), сформулировать рекомендации по их формированию и функционированию.

Решение указанных задач предполагает системный подход к рассмотрению управления ОНПК, при-

менение положений теорий жизненного цикла, логики регулирующих воздействий, а также методов структурно-функционального анализа, дедукции и индукции.

Методологической основой, помимо указанных инструментов исследования, служит научный задел, сформированный отечественными и зарубежными учеными по данной проблематике.

Развитие представления построения систем управления в инвестиционно-строительной сфере на основе диссипативных организационных структур обусловлено широким применением как в теоретическом, так и практическом аспектах подходов, связанных с инжинирингом, реинжинирингом, а также исследованиями явлений экономической конвергенции, когерентности и управленческой диссипации. Таким образом, можно указать теоретическую значимость исследования как развитие указанных теорий. Практическая ценность определяется количественным и качественным приращением новых знаний, появлением новых технологий, их ускоренным трансфером в сферу строительного производства [23–31].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С точки зрения кооперационных связей НПК могут быть вертикально или горизонтально интегрированными, а составляющие их организации или подразделения — самостоятельными или аффилированными. В зависимости от преследуемых целей в рыночной среде организации-участники (элементы системы) НПК подразделены на коммерческие, цель которых

извлечение прибыли, и некоммерческие, не ставящие перед собой подобной цели.

Приведенное многообразие элементов НПК определяет особенности формирования систем управления ими, которые дополняются отраслевой и региональной спецификой (рис. 1). Значительное влияние на организацию НПК и ее систем управления оказывают факторы, обусловленные научно-техническим прогрессом, запросами потребителей (пользователей) продукции, явлением конвергенции в экономике, а также необходимостью обеспечения технологического суверенитета и устойчивого развития. В этой связи следует отметить неодинаковый характер проявления этих факторов, они могут различаться по силе воздействия, объекту приложения, интенсивности, распределению по временной шкале и т.д. Соответственно все эти факторы способны составлять различные комбинации, т.е. наблюдается вариативность их воздействия (проявления), что также необходимо учитывать при организации системы управления НПК. Еще одним аспектом, обусловленным особенностями НПК, служит обеспечение научно-производственного цикла и его этапность.

Каждому этапу соответствует некоторый набор задач, которые решаются отдельными участниками НПК и которые определяют их специализацию и принадлежность (например, научные, проектные, производственные, контролирующие, общественные организации, государственные органы и т.д.). По охвату задач и соответственно набору функций в рамках НПК организации или подразделения также способ-

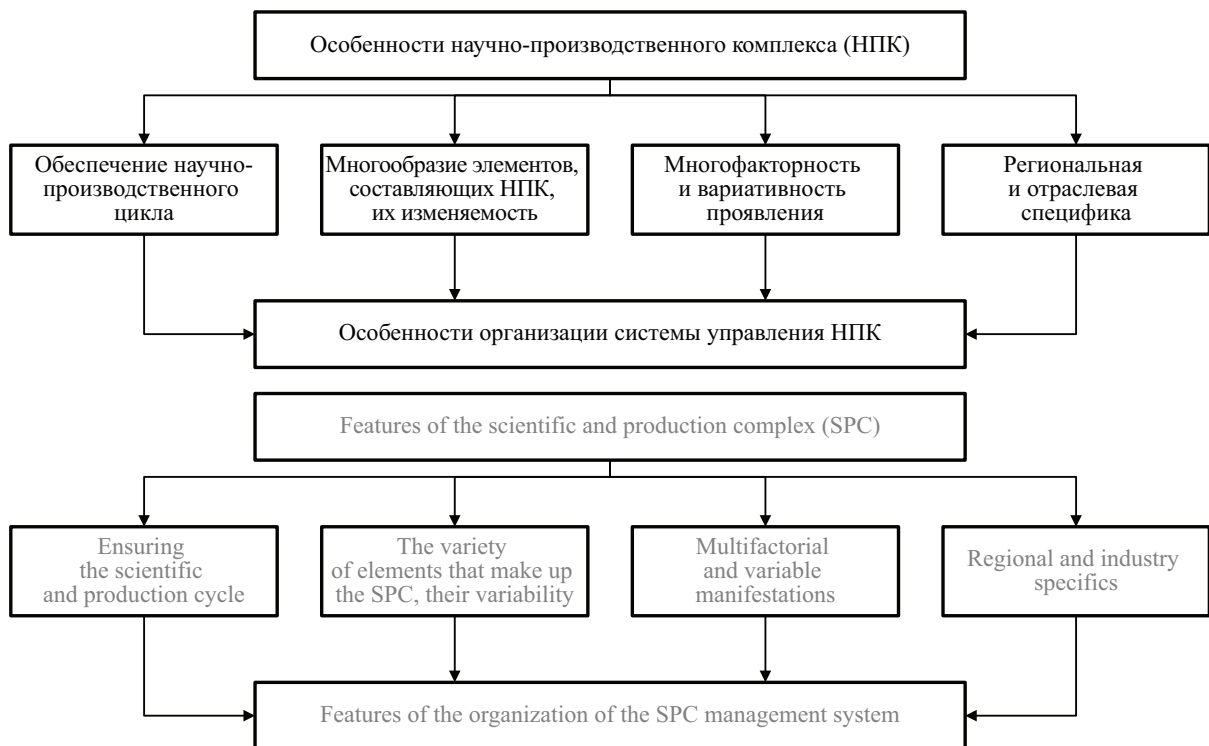


Рис. 1. Схема формирования особенностей организации систем управления научно-производственного комплекса

Fig. 1. The scheme of formation of the features of the organization of management systems of the scientific and industrial complex

ны различаться, например, могут заниматься одним видом деятельности — только научными исследованиями, или проектированием, конструированием, или производством продукции, а могут их комбинировать — научные исследования с проектированием, проектирование с производством и т.д. В то же время указанная специализация и охват задач не являются постоянными, они могут меняться в рамках отдельных инвестиционных программ и проектов. Таким образом, можно утверждать, что и соответствие деятельности отдельного участника определенному этапу научно-производственного цикла подвержено изменению.

Приведенные выше особенности функционирования НПК должны учитываться при формировании их систем управления, которые в этой связи должны обладать, в первую очередь, такими свойствами, как:

- адаптивность — способность НПК подстраиваться под изменения внешней среды;
- стабильность (или устойчивость) — свойство НПК функционировать, сохраняя свою структуру, а также функциональную идентичность;
- когерентность — свойство самоорганизации НПК за счет внутренних и внешних взаимодействий;
- адекватность — это соответствие регулирующих воздействий в НПК и информации, как их основы, реальной действительности;
- инновативность — способность всего НПК и его элементов воспринимать новации во всех сферах своей деятельности;

• эффективность — свойство, которое определяет способность НПК достигать поставленных целей при обеспечении требуемого качества продукции (услуг) и минимизации затрат на их производство (оказание).

Значение НПК для развития экономики, его особенности, специфика систем управления им, а также наличие в настоящее время существенных осложняющих внешних факторов в международном взаимодействии указывают на необходимость поиска новых схем организации управления НПК на уровнях иерархии. Рассматривая в исследовании отраслевой аспект научно-производственного развития, стоит сделать акцент на обеспечении поступательного приращения новых прикладных знаний и трансформацию их в новые технологии.

Следуя подобной логике, в первую очередь, необходимо отметить технопарковые структуры, основной целью которых является трансфер новых идей из научной сферы в производственную, их коммерциализация.

Технопарковые структуры получили широкое распространение в зарубежной инновационной практике в 80–90-е годы прошлого века, однако сохранили эффективность в настоящее время, но приобрели свою классификацию (рис. 2).

Как правило, для создания технопарковых структур характерна отраслевая направленность, обусловлено это тем, что они создаются на базе или вблизи научного центра (т.е. связаны с ним территориально

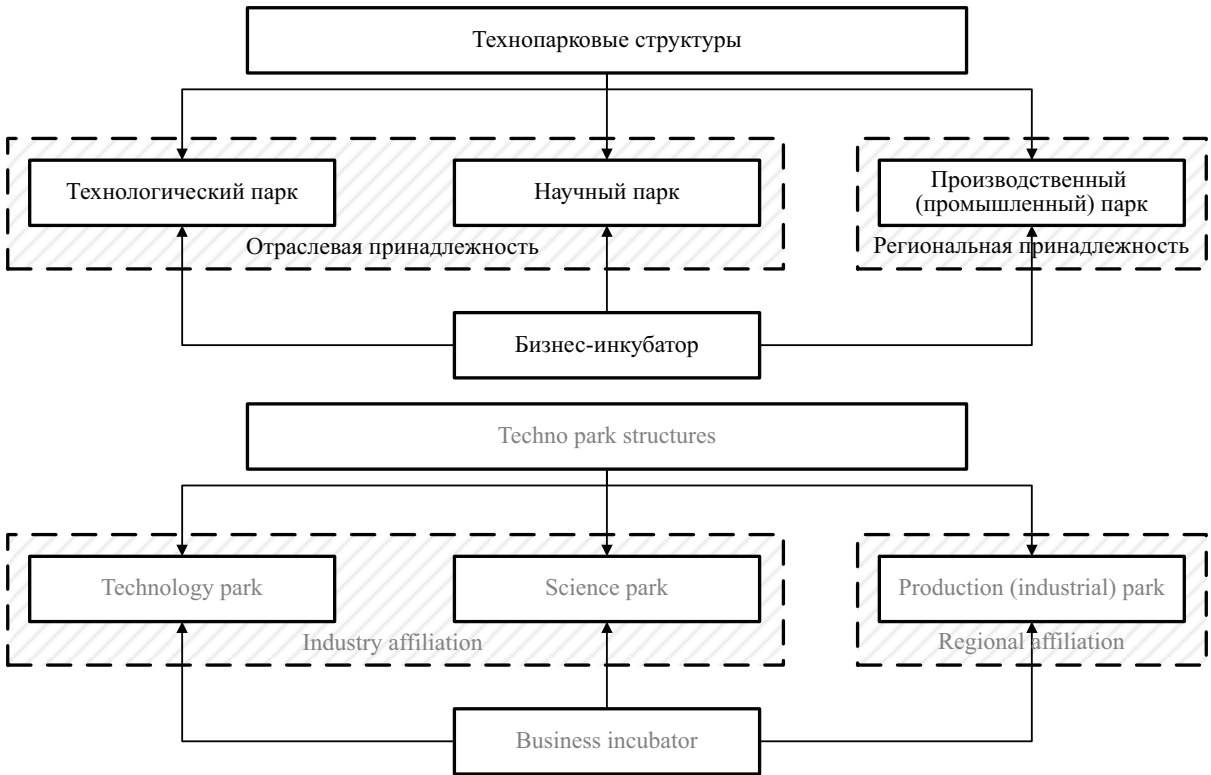


Рис. 2. Виды технопарковых структур

Fig. 2. Types of technopark structures

и организационно). Такими центрами в зарубежной практике, как правило, выступают университеты.

В зависимости от ориентации на тот или иной этап научно-производственного цикла подобные структуры принимают формат научного или техно-логического парка. В первом варианте делается упор на проведении прикладных научных исследований, которые в дальнейшем можно успешно коммерци-ализировать, во втором случае деятельность акцен-тируется на разработке производственной коммерче-ской технологии, основанной на новых знаниях.

Технопарковые структуры в региональном при-ложении принимают формат промышленных парков или бизнес-парков, основная цель которых создание инновационных или просто коммерческих компаний. В данном случае наличие тесной связи с научным центром не наблюдается, достаточно тех идей и зна-ний, которыми обладают создатели малых инноваци-онных компаний.

Если для организационного обособления (т.е. создания хозяйствующего субъекта) необходимы до-

полнительные или специфические условия (напри-мер, из-за нехватки сил, средств, коммерческого опы-та), то в составе технопарковых структур создаются бизнес-инкубаторы, которые могут быть их подраз-делениями как самостоятельными, так и аффили-рованными коммерческими единицами. Для реали-зации указанной цели они предоставляют услуги консультирования, аренды, поиска финансирования в привлекательном, удобном формате, которые отли-чаются комплексностью, возможностью делегирова-ния части коммерческих функций, наличием комму-никаций с другими участниками бизнес-инкубатора. Однако пребывание в бизнес-инкубаторе имеет сроч-ный и платный характер.

Аналогичный организационно-экономический механизм можно наблюдать и на корпоративном уров-не, когда крупные компании ведут собственные науч-ные разработки или привлекают их результаты извне. В подобных условиях формируется корпоративная кластерная структура научно-технической и иннова-ционной деятельности (рис. 3). В данной организа-

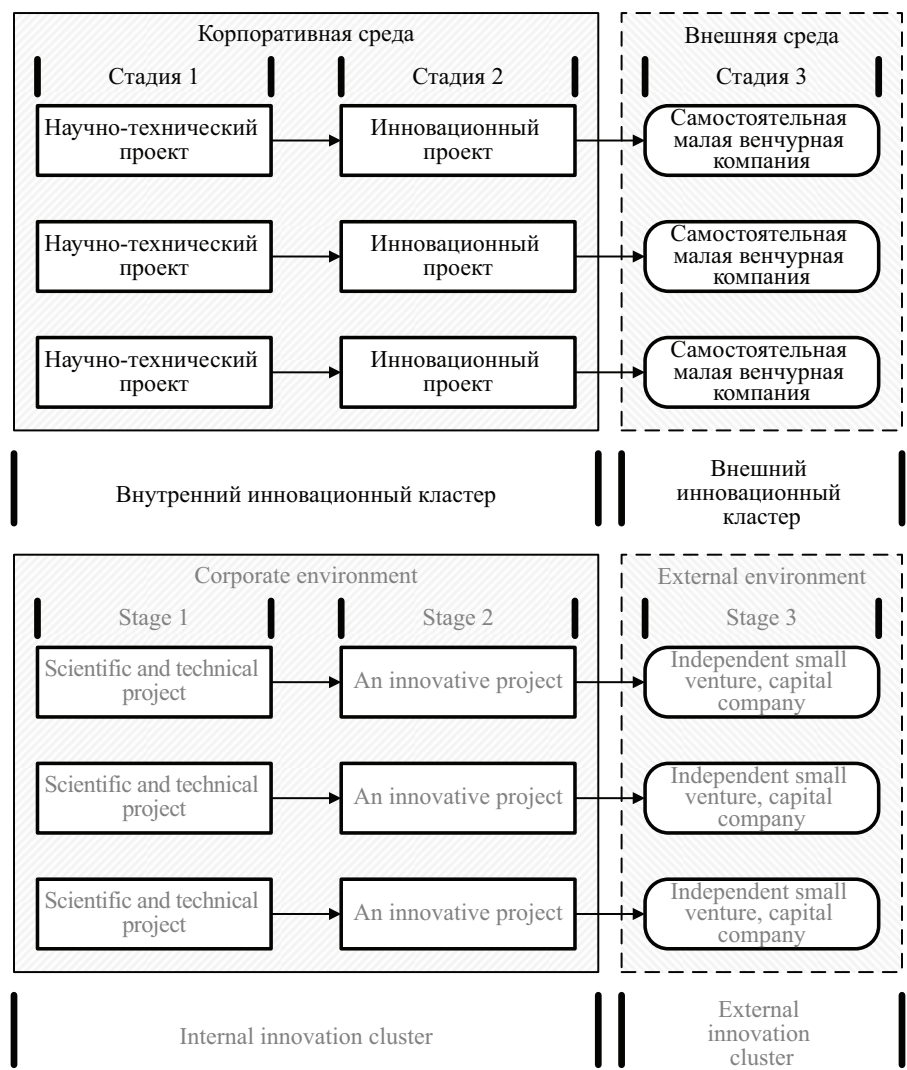


Рис. 3. Корпоративная кластерная структура научно-технической и инновационной деятельности

Fig. 3. Corporate cluster structure of scientific, technical and innovative activities

ционной схеме можно выделить два корпоративных инновационных кластера: внутренний и внешний. В такой группировке наблюдается определенная корреляция между этапами научно-производственного и жизненного цикла фирм (подразделений), образующих кластерную структуру. Так, формированию идеи, научным исследованиям, конструированию, разработке технологии соответствуют создание творческих коллективов, начало трансформации их в дочерние компании, они образуют внутренний инновационный кластер. В дальнейшем коммерциализация нового продукта, новой технологии приводит к полному или частичному обособлению созданной инновационной компании, которая становится уже частью внешнего кластера.

Следует отметить, что подобные организационные трансформации свойственны и рассмотренным выше технопарковым структурам, которые можно причислить к кластерным образованиям с ярко выраженной отраслевой или региональной привязкой. В корпоративной кластерной системе подобная привязка не наблюдается, а ее характер носит транс-территориальный и диверсификационный оттенок, определяемый, в первую очередь, экономической выгодой.

Технопарковые и корпоративные кластерные построения отличаются наличием некоторого множества полностью или частично обособленных хозяйствующих субъектов, имеющих собственные цели и траектории развития. Для того чтобы они не противоречили друг другу и не вступали в конфликт с общей генеральной стратегией, необходимы сбалансированные по приложению, интенсивности и силе воздействия, которые генерирует и контролирует система управления. Таким образом, организационно-экономическая когерентность побуждает управленческую диссипацию.

В широком смысле диссипация рассматривается как рассеивание или распределение, применительно к предмету исследования ее можно определить как рассеивание управленческих воздействий, распределения риска, прибыли, функций и т.д. между участниками научно-производственного комплекса. Так как количество участников достаточно велико и взаимодействие между ними находится под влиянием большого числа факторов (в том числе и субъективных), то и уровень диссипации будет соответствующий.

Внешняя экономическая среда находится в состоянии перманентного изменения, и ее состояние равновесия достаточно кратковременное, значительное время она пребывает в состоянии флуктуации и поиска этого равновесия. Рассматривая НПК как отдельную экономическую единицу с собственной иерархией, можно утверждать, что для устойчивого развития она должна по большей части быть в стабильном состоянии, даже несмотря на внешнее влияние. Такое состояние достигается за счет регу-

лятора и называется гомеостатическим равновесием. Таким регулятором в системе управления может быть организационная структура НПК, которая бы рассеивала (диссипатировала) отрицательные возмущения внешней среды.

Диссипация отрицательного влияния внешней среды нивелируется во многом за счет ответных флуктуаций субъектов, составляющих НПК. Подобная подстройка в рамках отдельного хозяйствующего субъекта имеет широкий спектр инструментов, например, за счет изменения структуры, состава, численности компании, ее продуктовой, технологической специализации и идентификации и т.д. Однако для обеспечения общего устойчивого развития необходим орган управления, который задавал бы соответствующий вектор движения за счет регулирующих воздействий, а также формировал интеграционную основу для функционирования всех элементов НПК как единого целого.

Подобные организационные структуры, которые обеспечивают устойчивое развитие в неравновесной экономической среде за счет своих специфических особенностей, можно назвать диссипативными.

Основное свойство подобных организационных построений, как определено выше, — это диссипативность, проявляющаяся как относительно внешнего влияния, так и регулирующих воздействий со стороны управляющей подсистемы.

Кроме данной особенности, диссипативные структуры обладают такими свойствами, как:

- кластерность — упорядочение элементов диссипативных структур на группы однотипных по заданному критерию объектов;
- конвергентность — сходимость элементов диссипативных структур по определенным видам деятельности, процессам, характерным для их функционирования и установленным в связи с целеполаганием системы;
- изменяемость — способность количественно и качественно трансформировать связи между элементами и элементами диссипативных структур;
- сложность — свойство, которое определяется многофакторностью во взаимодействии, многозадачностью в функционировании и эмерджентностью в построении;
- спонтанность — способность под влиянием внутренних побуждений, взаимодействий к активным действиям, в том числе к самоорганизации.

Приведенные свойства указывают на наличие отличительных особенностей организационно-экономического механизма функционирования НПК на основе диссипативных структур. Рассматривая отраслевой контекст научно-производственной деятельности, можно утверждать, что сформулированные предложения и рекомендации во многом будут справедливы и для регионального приложения диссипативных структур.

Организационно-экономический механизм управления ОПНК предусматривает некоторое построение (упорядочение по структуре и составу) и наличие экономических инструментов (методов) управления (рис. 4). По составу данный механизм охватывает хозяйствующие субъекты, которые в своей деятельности так или иначе соприкасаются с ОПНК, входят в его контур и тем самым образуют диссипативную структуру.

Экономические методы управления ОПНК связаны с применением программно-целевого подхода, предполагающего из-за специфики предметной области индикативное планирование и венчурное финансирование. Реализация данного подхода как в методологии, так и в практике указывает на использование проектного управления. Однако в силу того, что в системе наблюдаются собственные подчас сильные флуктуации хозяйственно обособленных элементов, для обеспечения устойчивого поступательного развития по заданной траектории и в границах, определен-

ных индикативными планами, требуется подсистема контроллинга. Эта подсистема не только отслеживает состояние внутри системы, а также внешней среды, сопоставляет фактические параметры с запланированными значениями, но и способствует выработке корректирующих мероприятий в случае, если система сошла с обозначенной траектории развития.

Для принятия эффективных корректирующих мероприятий, адекватного определения экономического положения ОПНК, а также установления тенденций развития науки и техники в обозначенной предметной области целесообразно для приведенных процедур привлекать экспертное сообщество. В нем эксперты могут быть сгруппированы по определенным тематикам и направлениям деятельности.

Как уже отмечалось выше, возможна проекция данного организационно-экономического механизма в региональную плоскость и на корпоративный уровень, он также может быть адаптирован к технопарковым и кластерным структурам.

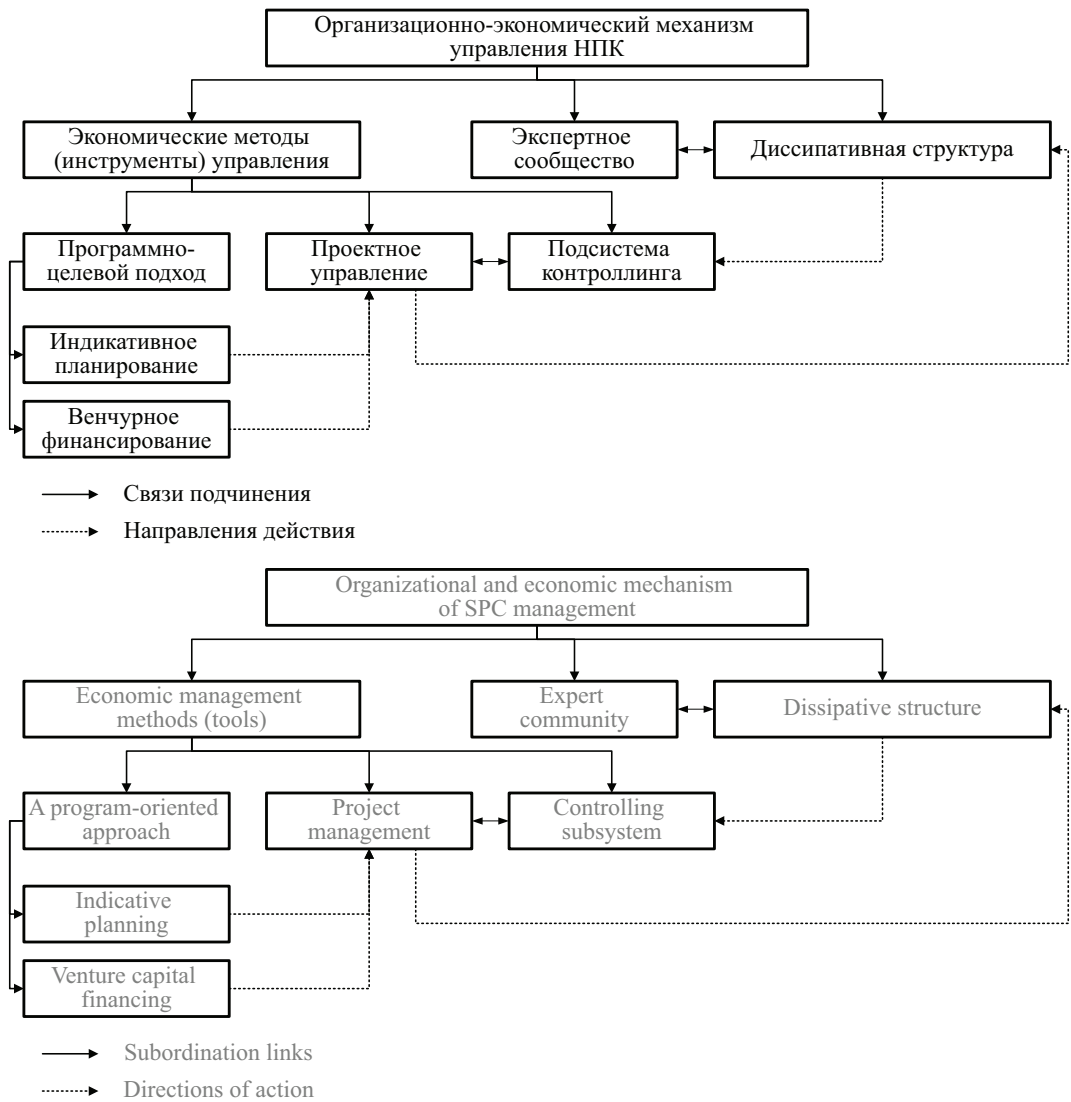


Рис. 4. Элементы организационно-экономического механизма управления отраслевого научно-производственного комплекса
Fig. 4. Elements of the organizational and economic management mechanism of the branch scientific and industrial complex

Эффективность управления ОНПК на основе диссипативных структур будет определяться приращением научно-технической и инновационной продукции. Данного результата можно добиться за счет экстенсивного или интенсивного развития ОНПК. В первом случае приращение указанной продукции достигается за счет увеличения числа участников научно-производственного процесса, во втором — за счет роста их производительности. Возможно сочетание этих двух вариантов.

При реализации мероприятий повышения эффективности ОНПК и соответственно его управления необходимо стремиться к снижению трудоемкости и себестоимости научно-технической и инновационной продукции, а этого можно в значительной мере добиться при помощи автоматизации как управленческих процессов, так и производственных, переходящей по мере развития технологий в роботизацию. Однако при этом происходит изменение не только состава и структуры затрат, но и трансформация управленческих и производственных процессов, а также организационных связей, технологических последовательностей. Подобный реинжиниринг возможен как на уровне отдельного хозяйствующего субъекта, так и всего комплекса, что указывает на свойства НПК и особенности диссипативных структур [32–39].

Ускорение научно-технического прогресса непосредственно влияет на усложнение задач в отраслевом контексте, что применительно и к строительству. Таким образом, подход к управлению производственными системами, основанный на представлении их диссипативными структурами, имеет хорошие перспективы. Подобное представление, как уже отмечалось, в полной мере справедливо относительно технопарковых, кластерных структур, а также организационных структур в рамках инжиниринговой схемы управления строительством. Из приведенного выше видно, что предметные области этих категорий имеют значительное совмещение, так, например, технопарки обладают явной кластерностью и проявляют себя как диссипативные структуры, аналогично можно охарактеризовать организационную структуру инжиниринговой схемы строительства, которую также можно назвать кластерной и диссипативной. Отталкиваясь от принципа верификации, допустимо утверждать, что технопарки осуществляют свою деятельность на принципах инжиниринговой схемы, в которой разделены функции управления системой и производства, выполнения работ.

В то же время каждая из указанных структур имеет свою специфику, которую определяют их предметная область и реализуемый вид деятельности. Методологически будет верно, если рассматривать технопарковые структуры применительно к организационным построениям, осуществляющим прикладные исследования и трансфер их результатов в сферу

производства, с которой следует в большей степени отождествлять инжиниринговые структуры, в региональном аспекте НПК — это кластерная структура со своими уровнями иерархии. Но так или иначе все эти структуры можно считать диссипативными.

В этой связи возможно сформулировать общие рекомендации по формированию и функционированию в представлении какого-либо объединения (в том числе ОНПК) диссипативной структурой:

- 1) значительное количество участников;
- 2) хозяйственная самостоятельность участников (элементов системы) ОНПК, но предполагающая ассоциативность с ним (т.е. наличие ассоциативных связей);
- 3) централизация стратегического планирования и управления, децентрализация оперативного управления, а также производственных функций;
- 4) система управления должна базироваться на индикативном планировании и включать подсистему стратегического контроллинга;
- 5) основной инструмент решения стратегических задач — это программно-целевой подход, а его реализация предполагает проектное управление;
- 6) чем больше входящих в ОНПК участников (элементов системы), тем выше его результативность;
- 7) для повышения эффективности и обоснованности регулирующих воздействий в системе ОНПК необходимо создание экспертного органа (сообщества).

Приведенные рекомендации отражают базовые положения функционирования диссипативных структур ОНПК и могут быть дополнены или детализированы в зависимости от отраслевых особенностей или решаемых задач (их сложности и важности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многоплановость и амбициозность решаемых в настоящее время строительной отрасли задач указывают на необходимость нового трактования их постановки, особенно относительно обеспечения научного лидерства и технологического суверенитета. В подобной логике возможно рассматривать ОНПК как систему с диссипативной организационной структурой. Таким образом, основной акцент управления — это не поиск равновесия системы, а обеспечение развития во многом за счет ее самоорганизации. Подобное представление ОНПК будет способствовать повышению его результативности за счет количественного и качественного приращения новых знаний, появлению новых технологий и ускорит их трансфер в сферу строительного производства, будет ориентировано на более полный учет запросов потребителей (пользователей) строительной продукции, а также повышение ее качества при одновременном снижении продолжительности и стоимости возведения зданий и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колосова Е. BIM-технологии в инвестиционно-строительной деятельности. Итоги дискуссионного клуба НПИ // Геоинфо. 2022. № 2. С. 32–35. EDN GAVEVM.
2. Хрипко Т.В. Исследование применения технологий информационного моделирования в строительной отрасли КНР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 50–52. EDN OWZZEX.
3. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101
4. Жаров Я.В. Информационное моделирование строительства на основе блочнокластерной структуры // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 11. С. 10–14. EDN XTWNSE.
5. Жаров Я.В. Организационно-технологическое проектирование в строительстве на основе интеллектуального блока планирования // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 193–199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ.
6. Киевский И.Л., Арзунов С.В., Жаров Я.В., Юргайтис А.Ю. Алгоритмизация систем планирования, управления и обработки информации в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 14–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY.
7. Коченкова Е.М., Денисов А.В. Информационное моделирование при решении вопросов защиты окружающей среды объектов строительства // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2022 : сб. докл. Третьей Нац. науч. конф. 2023. С. 583–587. EDN BYPLIE.
8. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. мат. семинара молодых ученых XXV Междунар. науч. конф. 2022. С. 115–120. EDN XSOQZK.
9. Буренин В.С., Езерский В.А., Монастырев П.В. Исследование современных тенденций проектирования жилых зданий в России и за рубежом // Архитектура и время. 2017. № 5. С. 2. EDN YMXHRR.
10. Силка Д.Н., Ермолаев Е.Е. Методологические аспекты новой модели развития строительного комплекса // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 1 (20). С. 34. EDN QIGNGG.
11. Симанович В.М., Ермолаев Е.Е. Осуществление строительства, реконструкции, капитального ремонта объекта капитального строительства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2018. № 12. С. 4–8. EDN WIDEBF.
12. Монастырев П.В., Евдокимцев О.В., Гавриков В.А., Зеленин Г.В. Институт архитектуры, строительства и транспорта в проблемах устойчивого развития региона // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 46–68. EDN UMONJC.
13. Захаров П.Н., Матвеев М.Ю., Хижняков Д.М. Анализ подходов к оценке уровня инновационности развития строительных организаций // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 143–151. EDN TKNHQT.
14. Коробко В.И., Карданская Н.Л., Матвеев М.Ю. Философские категории развития в теории управления // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 8–14. EDN TKNHEV.
15. Сборщиков С.Б. Логистика регулирующих воздействий в инвестиционно-строительной сфере (теория, методология, практика) : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2012. 361 с. EDN QGBVJV.
16. Сборщиков С., Лазарева Н. Реинжиниринг строительных организаций и реинжиниринг строительной отрасли // Русский инженер. 2022. № 3 (76). С. 45–47. EDN XWACRC.
17. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А., Лазарева Н.В. Проектное управление: инжиниринг и реинжиниринг в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 12. С. 75–82. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.75-82. EDN DXYNBS.
18. Сборщиков С.Б. Организационные методы активизации научно-технической и инновационной деятельности в строительстве на основе территориально-отраслевых технопарков : дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. 167 с. EDN QDGNYN.
19. Лазарева Н.В. Кластерная модель организации инновационной деятельности на корпоративном уровне в строительстве : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 185 с. EDN WMNZDJ.
20. Lazareva N. Innovative components of sustainable development in construction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04001. DOI: 10.1051/mateconf/201819604001
21. Лейбман Д.М. Организационная модель интегрального контроля реализации проектов строительства технически сложных объектов : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2021. 153 с. EDN FKKPJP.
22. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03015. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199703015
23. Субботин А.С. Кластерная модель организации интегрированных структур в строительстве (на примере государственно-частных партнерств) : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 180 с. EDN BSJOHN.
24. Бахус Е.Е. Организационные решения обеспечения качества строительства объектов ядерной энергетики : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2021. 176 с. EDN CPPMBV.

25. Ермолаев Е.Е. Зарубежный и отечественный опыт использования элементов инжиниринга, аутсорсинга и аутстаффинга в строительном производстве // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 4. С. 49–67. EDN LNBLOC.

26. Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А. Комплексный инжиниринг как способ интенсификации строительного производства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2018. № 3. С. 37–41. EDN QIPUEW.

27. Шинкарева Г.Н. Интенсификация строительного производства за счет применения комплексного инжиниринга // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2017. № 7. С. 43–46. EDN RAOOYW.

28. Шинкарева Г.Н. Модель инжиниринговой схемы организации строительства для контрактов жизненного цикла : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 172 с. EDN XJZLZQ.

29. Малахов В.И. Стратегия структуризации промышленно-строительного холдинга : дис. ... канд. экон. наук. М., 2005. 155 с. EDN KJZTJW.

30. Попков А.Г. Реализация комплексных логистических решений корпорации «единого заказчика»: на примере строительной отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 5–1. С. 324–328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR.

31. Попков А.Г. Кадровое обеспечение строительного производства. Новые подходы к формированию, функционированию, регулированию // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2011. № 8. С. 29–33. EDN ODWQKJ.

32. Шумейко Н.М. Понятия стоимости в строительстве // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 42–45. EDN YMXDRJ.

33. Малахов В.И. Ресурснопроектный метод — ценообразование в системе BIM // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 3 (991). С. 52–56. EDN XXAUML.

34. Журавлёв П.А. Инженерная защита. Требуемые изменения строительных нормативов и регламентов // Русский инженер. 2022. № 4 (77). С. 44–48. EDN NAFYWT.

35. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05039. DOI: 10.1051/mateconf/201825105039

36. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128

37. Яжлев И.К., Попков А.Г., Белогурова О.А. Проблемы нормативно-правового обеспечения внедрения ресурсо-, энергосберегающих технологий в градостроительной деятельности // Экономика и предпринимательство. 2020. № 3 (116). С. 1000–1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW.

38. Ключев В.Д., Зайцев Д.А., Журавлев П.А. Нормативная база для стоимостной оценки капитального ремонта многоквартирных домов // Управление многоквартирным домом. 2015. № 1.

39. Журавлев П.А. Номенклатура требуемых объектов капитального строительства для ресурсно-технологического моделирования // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 52–57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL.

Поступила в редакцию 14 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 23 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 5 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Борисович Сборщиков — доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, дирекция научно-технических проектов и экспертиз; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»);** 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; заведующий кафедрой промышленного менеджмента; **Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС);** 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; РИНЦ ID: 431022, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Наталья Валериевна Лазарева — кандидат технических наук, доцент, руководитель проектов; дирекция научно-технических проектов и экспертиз; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»);** 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; доцент кафедры промышленного менеджмента; **Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС);** 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; РИНЦ ID: 808973, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Дмитрий Михайлович Лейбман — кандидат технических наук, директор по производству; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»);** 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; tous2004@mail.ru.

Вклад авторов:

Сборщиков С.Б. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, научное редактирование, итоговые выводы.

Лазарева Н.В. — обработка материала, проведение исследования.

Лейбман Д.М. — доработка текста, описание результатов и формулирование выводов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kolosova E. BIM technologies in investment and construction activities. The results of the NPI discussion club. *Geoinfo*. 2022; 2:32-35. EDN GAVEVM. (rus.).
2. Khripko T.V. Research of application of information modeling technologies in the construction industry of KNR. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2021; 2:50-52. EDN OWZZEX. (rus.).
3. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101
4. Zharov Ya.V. Building information modeling based on block-cluster structure. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 11:10-14. EDN XTWNSE. (rus.).
5. Zharov Ya.V. Organizational technological design in construction based on an intelligent planning unit. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 6(77):193-199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ. (rus.).
6. Kievsky I.L., Argunov S.V., Zharov Ya.V., Yurgaitis A.Yu. Algorithmization of planning, management and information processing systems in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 11:14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY. (rus.).
7. Kochenkova E.M., Denisov A.V. Information modeling in solving environmental protection issues of construction facilities. *Actual problems of the construction industry and education — 2022 : collection of reports of the Third National Scientific Conference*. 2023; 583-587. EDN BYPLIE. (rus.).
8. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle. *Construction — formation of the living environment : collection of materials of the seminar of young scientists of the XXV International Scientific Conference*. 2022; 115-120. EDN XSOQZK. (rus.).
9. Burenin V.S., Ezersky V.A., Monastirev P.V. Investigation of modern trends in the design of residential buildings in Russia and abroad. *Architecture and Time*. 2017; 5:2. EDN YMXHRR. (rus.).
10. Silka D., Ermolaev E. Methodological aspects of the new model of building complex. *Online journal of Science Studies*. 2014; 1(20):34. EDN QIGNGG. (rus.).
11. Simanovich V.M., Ermolaev E.E. Implementation of construction, reconstruction, capital repairs of a capital construction facility. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 12:4-8. EDN WIDEBF. (rus.).
12. Monastirev P.V., Evdokimtsev O.V., Gavrikov V.A., Zelenin G.V. Institute of Architecture, Construction and Transport in the problems of sustainable development of the region. *Sustainable development of the region: architecture, construction and transport : materials of the VIII-th International Scientific and Practical Conference*. 2021; 46-68. EDN UMONJC. (rus.).
13. Zakharov P.N., Matveev M.Yu., Khizhnyakov D.M. Analysis of approaches to assessing the level of innovation in the development of construction organizations. *Innovations in the sectors of the national economy, as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 143-151. EDN TKNHQT. (rus.).
14. Korobko V.I., Kardanskaya N.L., Matveev M.Yu. Philosophical categories of development in management theory. *Innovations in the sectors of the national economy, as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 8-14. EDN TKNHEV. (rus.).
15. Sborshchikov S.B. *Logistics of regulatory impacts in the investment and construction sector (theory, methodology, practice) : dis. ... doc. economics*. Moscow, 2012; 361. EDN QGBVJV. (rus.).
16. Sborshchikov S., Lazareva N. Reengineering of construction organizations and reengineering of the construction industry. *Russian Engineer*. 2022; 3(76):45-47. EDN XWACRC. (rus.).
17. Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A., Lazareva N.V. Project management: engineering and reengineering in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 12:75-82. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.75-82. EDN DXYNBS. (rus.).
18. Sborshchikov S.B. *Organizational methods of activating scientific, technical and innovative activities in construction based on territorial and sectoral technoparks : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2000; 167. EDN QDGNHY. (rus.).
19. Lazareva N.V. *Cluster model of organization of innovation activity at the corporate level in construction : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2015; 185. EDN WMNZDJ. (rus.).
20. Lazareva N. Innovative components of sustainable development in construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04001. DOI: 10.1051/mateconf/201819604001
21. Leibman D.M. *Organizational model of integrated control of the implementation of projects for the construction of technically complex facilities : dis. ... cand. of technical sciences*. Ivanovo, 2021; 153. EDN FKKJPJ. (rus.).
22. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015
23. Subbotin A.S. *Cluster model of the organization of integrated structures in construction (on the example of public-private partnerships) : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2014; 180. EDN BSJOGH. (rus.).

24. Bahus E.E. *Organizational solutions for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities : dis. ... cand. of technical sciences*. Ivanovo, 2021; 176. EDN CPPMBV. (rus.).

25. Ermolayev E.E. Foreign and domestic experience in the use of elements of engineering, outsourcing and outstaffing in the construction industry. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 4:49-67. EDN LNBLOC. (rus.).

26. Shinkareva G.N., Maslova L.A. Integrated engineering as a way to intensify construction production. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 3:37-41. EDN QIPUEW. (rus.).

27. Shinkareva G.N. Intensification of construction production through the use of integrated engineering. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2017; 7:43-46. EDN RAOOYW. (rus.).

28. Shinkareva G.N. *Model of engineering scheme of construction organization for life cycle contracts : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2018; 172. EDN XJZLZQ. (rus.).

29. Malakhov V.I. *Strategy of structuring an industrial and construction holding : dis. ... cand. of economic sciences*. Moscow, 2005; 155. EDN KJZTJW. (rus.).

30. Popkov A.G. Implementation of integrated logistics solutions of the corporation "single customer": on the example of the construction industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2022; 12(5-1):324-328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR. (rus.).

31. Popkov A.G. Staffing of construction production. New approaches to the formation, functioning, regulation. *Technical Regulation. Construction, Design and Surveys*. 2011; 8:29-33. EDN ODWQKJ. (rus.).

32. Shumeyko N.M. Concepts of the construction cost estimate. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2018; 11(1011):42-45. EDN YMXDRJ. (rus.).

33. Malakhov V.I. Project resource method — pricings in BIM. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2017; 3(991):52-56. EDN XXAUML. (rus.).

34. Zhuravlev P.A. Engineering protection. Required changes in building regulations and regulations. *Russian Engineer*. 2022; 4(77):44-48. EDN NAFYWT. (rus.).

35. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:05039. DOI: 10.1051/mateconf/201825105039

36. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128

37. Yazhlev I.K., Popkov A.G., Belogurova O.A. Problems of regulatory support for the introduction of resource-and energy-saving technologies in urban development. *Economics and Entrepreneurship*. 2020; 3(116): 1000-1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW. (rus.).

38. Klyuev V.D., Zaitsev D.A., Zhuravlev P.A. Regulatory framework for the cost assessment of capital repairs of apartment buildings. *Management of an Apartment Building*. 2015; 1. (rus.).

39. Zhuravlev P.A. Nomenclature of capital construction objects required for resource and technological modeling. *Industrial and Civil Engineering*. 2020. № 7. C. 52–57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL. (rus.).

Received August 14, 2024.

Adopted in revised form on August 23, 2024.

Approved for publication on October 5, 2024.

B I O N O T E S : **Sergej B. Sborshchikov** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Chief Researcher, Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; Head of the Department of Industrial Management; **National University of Science and Technology "MISIS" (NUST MISIS)**; build. 1, 4 Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RSCI: 431022, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Natal'ya V. Lazareva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Project Manager; Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Industrial Management; **National University of Science and Technology "MISIS" (NUST MISIS)**; build. 1, 4 Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RSCI: 808973, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Dmitrij M. Lejbman — Candidate of Technical Sciences, Director of Production; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; tous2004@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergej B. Sborshchikov — scientific guidance, research concept, methodology development, writing the source text, scientific editing, final conclusions.

Natal'ya V. Lazareva — processing of the material, conducting the study.

Dmitrij M. Lejbman — revision of the text description of the results and formation of conclusions of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)**Introduction:** text, text, text.**Materials and methods:** text, text, text.**Results:** text, text, text.**Conclusions:** text, text, text.**Key words:** text, text, text.**Acknowledgements:** text, text, text.**Corresponding author:** Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

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.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgсу.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgсу.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgсу.ru/>



