

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 3
2025**

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

Сквозной номер 196

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 3
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	24.03.2025.
Подписан в свет	26.03.2025.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,58. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 74	

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

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 Емило, 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 Маплян, 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: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Андрей Александрович Морозенко, д-р техн. наук, доц., проф. 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

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:	24.03.2025

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszkuk, 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: *Alla R. Tabekova*

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

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

О.И. Ханова
Церковь Великомученицы Параскевы в деревне Воймозеро. Строительная история и архитектурные особенности 351

В.Н. Ткачев
Линейная генетика архитектуры 361

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

Н.Ч. Чык, Х.К. Лонг, Л.В. Хунг, Н.А. Анискин
Применение ингибиторов тепла гидратации цемента для борьбы с термическим трещинообразованием в массивных бетонных конструкциях 371

С.Г. Саиян, В.Б. Шелепина
Применение методов машинного обучения для прогнозирования аэродинамических коэффициентов давления на здания и сооружения прямоугольных форм 381

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Н. Шувалов, О.А. Корнев, В.А. Какуша, Ю.А. Жидков, А.В. Корнилова, В.А. Ермаков, Д.Е. Капустин, М.В. Федоров, А.В. Насоновский
Экспериментальное исследование прочности и выносливости клееной древесины на скалывание, сжатие и изгиб 394

И.Ю. Маркова, М.А. Степаненко, В.В. Строкова, Н.О. Лукьяненко
Исследование активности отходов тепловых электростанций с позиции применения в составе минеральных вяжущих 409

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.Ю. Гуринович, Д.А. Поздняков, С.Н. Леонович
Оптимизация производства в условиях выпуска широкой номенклатуры изделий 419

А.Н. Тиратурян, А.В. Воробьев, Ч. Ян.
Сценарии эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог в условиях действующего нормативного регулирования 429

Д.В. Слепушкин, Д.Ю. Бурлов
Возможности искусственного интеллекта и автоматизации процессов проектирования в строительстве: библиометрический анализ 440

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Ю.В. Посвятенко
История образования Московского практического строительного института 456

Требования к оформлению научной статьи 464

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Oksana I. Khanova
Church of the Great Martyr Paraskeva in the village of Voymozero. Construction history and architectural features 351

Valentin N. Tkachev
Linear genetics of architecture 361

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

Nguyen Trong Chuc, Hoang Quoc Long, Le Van Hung, Nikolay A. Aniskin
Application of cement hydration heat inhibitors to control thermal cracking in massive concrete structures 371

Sergey G. Saiyan, Veronica B. Shelepina
Application of machine learning methods to predict aerodynamic pressure coefficients on rectangular buildings and structures 381

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Aleksandr N. Shuvalov, Oleg A. Kornev, Vladimir A. Kakusha, Yuri A. Zhidkov, Anna V. Kornilova, Valentin A. Ermakov, Dmitrii E. Kapustin, Maxim V. Fedorov, Aleksey V. Nasonovskiy
Experimental study of the strength and endurance of glued timber on shearing, compression and bending 394

Irina Yu. Markova, Margarita A. Stepanenko, Valeria V. Strokova, Nikita O. Lukyanenko
Study of the activity of thermal power plant waste from the point of application in mineral binders 409

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Vitaliy Yu. Gurinovich, Dmitrii A. Pozdnyakov, Sergey N. Leonovich
Optimization of production under conditions of production of a wide range of products 419

Artem N. Tiraturyan, Andrey V. Vorobev, Chun Yang
Scenarios of the operational stage of the road life cycle under the current regulatory environment. 429

Dmitrii V. Slepushkin, Dmitrii Yu. Burlov
Artificial intelligence and automation of design processes in construction: a bibliometric analysis 440

SHORT MESSAGES. DISCUSSIONS AND REVIEWS. INFORMATION

Yulia V. Posvyatenko
History of the Moscow practical construction institute 456

Requirements for research paper design 464

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 347.787

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.351-360

Церковь Великомученицы Параскевы в деревне Воймозеро. Строительная история и архитектурные особенности

Оксана Ивановна Ханова^{1,2}

¹ Автономная некоммерческая организация Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества «Традиция» (АНО «Традиция»); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Объект исследования — единственный сохранившийся образец крупной деревянной шатровой часовни в Нижнем Поонежье. Памятник архитектуры построен в д. Воймозеро в 1746 г. как часовня. В 1864 г. часовня была перестроена в церковь. Рассматриваемый памятник хорошо сохранил подлинность, этим он ценен. Объект бегло представлен в нескольких публикациях, но специального историко-архитектурного исследования не было. Архитектурные особенности памятника детально ранее не изучались, также они не сопоставлялись с характеристиками других храмовых сооружений территории вдоль берегов в низовье р. Онеги и Русского Севера в целом. Данная статья способствует восполнению этих пробелов.

Материалы и методы. При исследовании памятника архитектуры применен комплексный подход — специальные научно-реставрационные и общенаучные методы. Основа исследований — исторические архивные документы, библиографические источники, материалы натурного обследования. Проведен сопоставительный анализ объекта исследования с аналогами на территории Нижнего Поонежья и Русского Севера для выявления архитектурных особенностей, а также общих традиций.

Результаты. В научный оборот введены новые исторические источники. Осуществлены натурные обследования, выявлен комплекс архивно-библиографических материалов. На основании этих сведений определена строительная периодизация объекта исследования церкви Великомученицы Параскевы в д. Воймозеро — ее первоначальный облик и происходившие со временем изменения. Установлена значимость памятника архитектуры в контексте строительства храмовых сооружений Нижнего Поонежья XVII – начала XX в. Выполнена графическая реконструкция объекта на начало XX в. — период окончательного формирования внешнего облика памятника.

Выводы. Церковь Великомученицы Параскевы — объект культурного наследия регионального значения. Сведения, полученные в результате исследования, могут быть полезны как для расширения знаний об истории русской архитектуры, так и для практического применения — в работе по сохранению памятников русского деревянного зодчества, повышению туристического интереса к региону.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: русское деревянное зодчество, Русский Север, Поонежье, шатровый храм, архитектурные исследования, строительная периодизация, типология, графическая реконструкция

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-01625 «Деревянные храмы нижней Онеги XVII – XIX веков. Архитектура, типология, традиции» (URL: <https://rscf.ru/project/24-28-01625/>). Автор выражает благодарность за помощь в исследовании доктору искусствоведения, заведующему кафедрой истории русского искусства Санкт-Петербургского государственного университета Е.В. Ходаковскому, архитектору-реставратору АНО «Традиция» С.В. Петровой, сотруднику Государственного Русского музея Ю.А. Щегловой.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ханова О.И. Церковь Великомученицы Параскевы в деревне Воймозеро. Строительная история и архитектурные особенности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 351–360. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.351-360

Автор, ответственный за переписку: Оксана Ивановна Ханова, khanovaoi@ya.ru.

Church of the Great Martyr Paraskeva in the village of Voymozero. Construction history and architectural features

Oksana I. Khanova^{1,2}

¹ Autonomous non-profit organization Research and restoration of wooden architecture monuments “Tradition”; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The object of the study is the only preserved example of a large wooden tent chapel in Nizhny Poonezhye. The architectural monument was built in the village of Voimozero in 1746 as a chapel. In 1864, the chapel was rebuilt into a church. The monument has preserved its authenticity well, which makes it valuable. The object is briefly presented in several publications, but there was no special historical and architectural research. The architectural features of the monument have not been studied in detail before, nor have they been compared with the characteristics of other temple structures of the territory along the banks in the lower reaches of the Onega River and the Russian North as a whole. This paper helps to fill in these gaps.

Materials and methods. The study of the architectural monument was based on a complex approach — special scientific restoration and general scientific methods. The basis of the research is historical archival documents, bibliographic sources, materials of a field survey. A comparative analysis of the research object with its analogues in the territory of the lower Poonezhye and the Russian North was also carried out to identify architectural features, as well as common traditions.

Results. New historical sources have been introduced into scientific circulation. Field surveys were conducted, a set of archival and bibliographic materials was identified. Based on these data, the construction periodization of the object of study of Church of the Great Martyr Paraskeva in the village of Voimozero was determined — its original appearance and the changes that took place over time. The significance of the architectural monument in the context of the construction of temple structures in the lower Poonezhye region of the XVII – early XX centuries is revealed. A graphic reconstruction of the object at the beginning of the XX century was performed — the period of the final formation of the monument's appearance.

Conclusions. Church of the Great Martyr Paraskeva is an object of cultural heritage of regional significance. The information obtained as a result of the study can be useful both for expanding knowledge about the history of Russian architecture, and for practical application — in the work on the preservation of monuments of Russian wooden architecture, increasing tourist interest in the region.

KEYWORDS: Russian wooden architecture, Russian North, Poonezhye, tent temple, architectural research, construction periodization, typology, graphic reconstruction

Acknowledgements. The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-28-01625 “Wooden churches of lower Onega in the XVII – XIX centuries. Architecture, typology, traditions” (URL: <https://rscf.ru/project/24-28-01625/>). The author expresses gratitude for assistance in the study to Doctor of Art History, Head of the Department of History of Russian Art of St. Petersburg State University E.V. Khodakovsky, architect-restorer of ANO “Tradition” S.V. Petrova, employee of the State Russian Museum Yu.A. Shcheglova.

FOR CITATION: Khanova O.I. Church of the Great Martyr Paraskeva in the village of Voimozero. Construction history and architectural features. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):351-360. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.351-360 (rus.).

Corresponding author: Oksana I. Khanova, khanovaoi@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Региональная архитектура — материальный носитель культуры. Она играет немаловажную роль в формировании идентичности человека [1, с. 2]. Также исторические здания являются неотъемлемой частью местного культурного ландшафта, представляя строительную традицию [2, с. 4784].

Дерево — наиболее распространенный строительный материал на протяжении многих веков. За это время сложились определенные строительные приемы и традиции в формообразовании [3, с. 357; 4, с. 1]. Деревянное зодчество — яркое явление в русской архитектуре, Русский Север считается его сокровищницей [5, с. 12; 6, с. 8]. В процессе освоения северорусских территорий Нижнее Поонежье играло важную роль, поскольку через р. Онегу был получен доступ к Белому морю. Это обусловило здесь широкую строительную деятельность, которая способствовала созданию поистине шедевров русского традиционного деревянного зодчества.

В статье рассматривается тип шатровой часовни, позже перестроенной в церковь. Это церковь Великомученицы Параскевы 1864 г. в д. Воймозеро Онежского района Архангельской области. Небольшая д. Воймозеро (Воймозерская) находится на берегу одноименного озера. Храм стоит в восточной части

поселения, ближе к воде. Церковь Великомученицы Параскевы — единственный сохранившийся до наших дней пример бывшей крупной деревянной часовни с шатровым завершением на нижней Онеге. Архитектурное решение объекта детально ранее не изучалось. В монографии Е.В. Ходаковского церковь Великомученицы Параскевы упоминалась в контексте изучения типологии памятников церковной архитектуры Русского Севера XIX – начала XX в. — объемно-планировочных решений и типов покрытий [7, с. 44–45, 90–91]. Т.М. Кольцова рассматривала внутреннее иконостасное убранство храма в ряду с другими сооружениями Северного Поонежья [8, с. 188–200].

Цель работы — архитектурно-историческое исследование конкретного памятника — церкви Великомученицы Параскевы в д. Воймозеро, а также определение места и роли объекта в общей группе деревянных храмов Нижнего Поонежья XVII – начала XX в. В задачи исследования входило натурное обследование, архивно-библиографические изыскания, сопоставительный анализ и обобщение полученных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применен комплексный подход — сочетание научно-реставрационных методов изучения памятников

с общенаучными методами. Первая группа методов используется при комплексных научных исследованиях реставрируемых памятников архитектуры. Она подразумевает сбор натурного и архивно-библиографического материала с его последующим анализом. Натурные обследования — фотофиксация объекта, архитектурные обмеры. Привлекаются исторические фотоматериалы, литературные и архивные документы [9, с. 78]. Это позволяет выявить строительную историю памятника архитектуры, а также выполнить графическую реконструкцию на последний этап формирования внешнего облика объекта. Вторая группа методов — сравнительно-типологический, исторический и эволюционный анализ объекта. Историческое сооружение рассматривается в ряду с другими памятниками архитектуры территории Нижнего Поонежья, в качестве одного из элементов целостной группы, объединенной единой строительной традицией. Это дает понимание архитектурных особенностей объекта в контексте региона и территории распространения русского деревянного зодчества в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый объект — церковь Великомученицы Параскевы 1864 г. в д. Воймозеро Онежского района Архангельской области (рис. 1). Проведенное изучение памятника архитектуры дало возможность определить его строительную историю, обнаружить архитектурные особенности объекта, как одной из старейших сохранившихся бывших деревянных шатровых часовен на нижней Онеге, а также выявить общие черты для исторических храмовых сооружений этой местности.

Церковь Великомученицы Параскевы в д. Воймозерской Вазенского прихода Онежского уезда



Рис. 1. Церковь Великомученицы Параскевы. Южный фасад (фото Е.В. Ходаковского, 2019 г.)

Fig. 1. Church of the Great Martyr Paraskeva. The southern facade (photo by E.V. Khodakovsky, 2019)

Архангельской губернии приписная, холодная, однопрестольная [10, с. 69]. Первоначально она была часовней, построенной по случаю «спасения от скотского падежа» в 1746 г. [8, с. 188]. Сооружение состоит из основного объема храма типа «восьмерик на четверике», пятигранной апсиды с востока, обширного притвора и паперти с колокольной с запада. Храм завершен высоким шатром с луковичной главкой на восьмигранном барабане с крестом. Апсида покрыта пятискатной крышей, притвор и паперть — единой двускатной крышей. Колокольная типа «восьмерик на четверике» с завершением куполом со шпилем. Сооружение рублено из бревен. Стены снаружи отделаны профилированной обшивкой. Вход в церковь расположен с запада, осуществлялся через закрытое крыльцо с двускатной крышей.

В процессе исследования объекта выяснено, что основа сооружения относится к более раннему периоду строительства — к 1746 г. [8, с. 188], а в 1800 г. постройка была отремонтирована [11, с. 61]. Имеются архивные описания часовни с размерами, относящимися к 1829 г., — деревянная часовня, наверху восьмерик с шатром и главой с крестом, длина с папертью (авт. — видимо, имелся в виду объем притвора) 5 саж., ширина 2,5 саж. [11, с. 61]. Эти размеры совпадают с габаритами существующего сооружения без алтарного прируба и паперти с колокольной. Первоначальное отсутствие апсиды и паперти подтверждают материалы натурного обследования — данные объемы представляют собой самостоятельные прирубы, соединенные с более ранним срубом в «шип – паз». Получается, сначала часовня имела традиционный вид «восьмерика на четверике» с повалом и высоким шатровым завершением с главкой, по всей видимости, с широким притвором.

Затем часовня была перестроена в церковь: «Храм во имя св. вкмч. Параскевы, нареченный Пятницы, деревянная, на каменном фундаменте, перестроен вновь из прежней часовни ... освящен 1864 года 24 января» [11, с. 61]. Преобразование часовни с помощью пристройки апсиды в церковь было обычным явлением [12, с. 33]. Историк архитектуры Е.В. Ходаковский отмечает, что «архивные документы на протяжении всего XIX в. фиксируют подобные работы во всех северных епархиях, особенно в тех местностях, где были сильны позиции старообрядцев» [7, с. 43]. Также он сообщает, что сруб часовни Великомученицы Параскевы был настолько маленьким, что решено не делать южную дверь иконостаса в восточной стене. Таким образом, в иконостасе имелись только царские врата и северная дверь для малого и большого входов во время литургии. Но это не нарушало чинопоследования богослужения [7, с. 44]. Надо сказать, что при перестройке объекта сохранилось шатровое завершение основного объема, стоящее на восьмерике с повалом.

Исследователь Т.С. Ковалевская пишет, что «несмотря на все законодательные ограничения, нако-

пленная в течение столетий инерция народного зодчества в ряде сооружений XIX в. вызывает к жизни традиционные архитектурные формы» [13, с. 198, 199]. Среди элементов традиционного образного строя деревянной церкви можно назвать и пристроенный алтарь «круглой» (пятигранной) формы. В это время сохранялись шатровые и кубоватые завершения храмов как при перестройке более древних памятников, так и при сооружении новых храмов.

В 1877 г. в историческом описании упоминается, что над папертью, которая, возможно, была пристроена ранее, сооружена небольшая колокольня с пятью колоколами на ней [11, с. 61]. В 1902 г. подведен новый фундамент — камни, уложенные на щиты длиной 4 аршина.

Внешний облик памятника сформировался в начале XX в. В 1904 г. была устроена новая колокольня, сохранившаяся до настоящего времени. Тогда же сделано глухое крыльцо с двускатной крышей, следы которого читаются при натурном обследовании памятника архитектуры. Оно также видно на фотографии 1980 г. (рис. 2). В том же 1904 г. в церкви устроен новый двухъярусный позолоченный иконостас [11, с. 63]. Он не сохранился. Имеются сведения, что в этот же период церковь была покрашена масляной краской. Значит, к 1904 г. она уже была в обшив-

ке. Т.С. Ковалевская отмечает, что «в отличие от боровской церкви (авт. — *Церкви Георгия Победоносца в д. Большой Бор*), храм Св. Параскевы имеет более строгий и традиционный облик: при перестройке он не был декорирован в духе каменных построек, хотя был обшит тесом и окрашен белилами целиком, включая шатер» [13, с. 206]. Стоит отметить, что сохранилось лемеховое покрытие на главе памятника с треугольным окончанием (рис. 3, а). На данный период времени выполнена графическая реконструкция объекта (рис. 3, b–d).

В один типологический ряд с церковью Великомученицы Параскевы по объемно-пространственной структуре храма, в том числе внешнему облику колокольни, можно поставить ранее упомянутую церковь Георгия Победоносца 1877–1883 гг. в д. Большой Бор, церковь Иоанна Предтечи 1881 г. (перестроена из часовни в 1916 г.) в ур. Усолжье, часовню Покрова Пресвятой Богородицы XVIII в. (в 1870 г. завершение основного объема перестроено из шатрового в купольное) в ур. Чёково, часовню Смоленской иконы Божией Матери конца XIX века в с. Верховье, часовню Иоанна Предтечи вторая половина XVIII – первая половина XIX века в д. Карбатово, церковь во имя Святителя Николая Чудотворца 1865–1867 гг. в д. Сырья [14].



Рис. 2. Церковь Великомученицы. Северный фасад (фото А. Ульянова, 1980 г.). Пятницкая церковь с колокольней¹

Fig. 2. Church of the Great Martyr. The northern facade (photo by A. Ulyanova, 1980). Pyatnitskaya church with a bell tower¹

¹ Пятницкая церковь с колокольней // OnegaOnline.ru. URL: <https://onegaonline.ru/seef.php?razdel=Воймозеро&x=Церковь%20Параскевы%20Пятницы&v=4864>

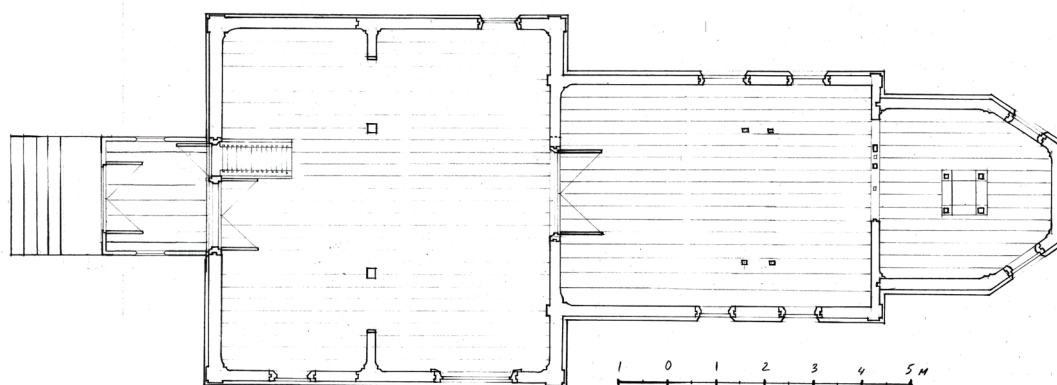
Схожую строительную историю в части переделки из часовни в церковь имеет храм Святого Онуфрия Великого 1846 г. в д. Грихновская. К основному объему постройки была приставлена не только апсида с восточной стороны, но и обширная трапезная с западной стороны. Делалось это по причине нехватки площади часовни для жителей увеличившейся деревни. Эта часовня была тоже шатровой и осталась с таким же завершением после перестройки в церковь. В процессе строительных работ восточная стена основного объема часовни разобрана [7, с. 43, 44]. Данный храм утрачен. Исследователь Е.В. Ходаковский

отмечает, что «на реке Онеге после упомянутых выше перестроек часовен в Грихновской (1846) и Воймозере (1864) тенденция к сохранению шатровых завершений часовен при обустройстве их в церкви продолжилась и в 1870-е гг., когда почти одновременно начались строительные работы в деревнях Чирковской и Боровской (Большом Бору)» [7, с. 90].

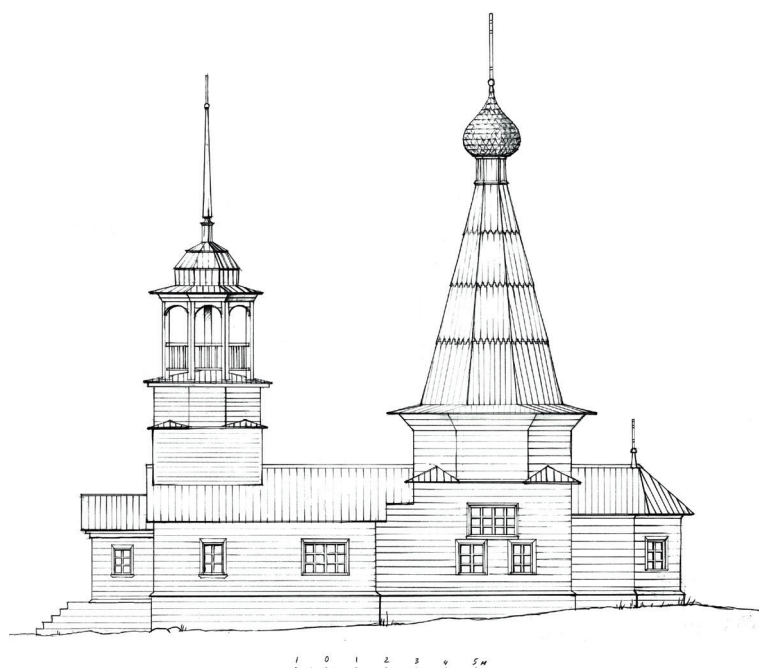
Имеются исторические сведения с изображением часовни Георгия Победоносца в д. Большой Бор, существовавшей до церкви. Внешне она напоминала небольшую шатровую церковь, только без алтарного прируба (рис. 4). Таким образом, достоверно извест-



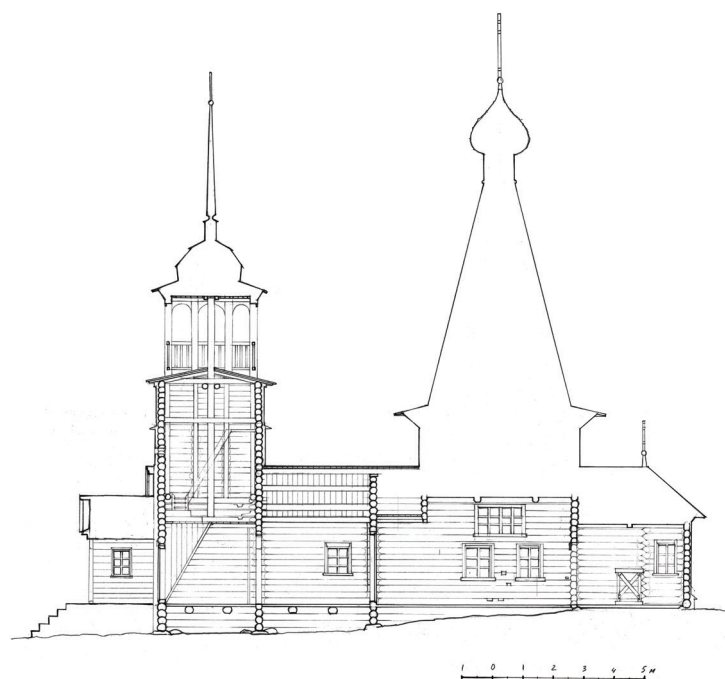
a



b



c



d

Рис. 3. Церковь Великомученицы Параскевы: *a* — главка с лемехом с треугольным окончанием (фото Е.В. Ходаковского, 2019 г.); *b* — план. Графическая реконструкция на начало XX в. (рис. С.В. Петровой); *c* — южный фасад. Графическая реконструкция на начало XX в. (рис. С.В. Петровой); *d* — продольный разрез. Графическая реконструкция на начало XX в. (рис. С.В. Петровой)

Fig. 3. Church of the Great Martyr Paraskeva: *a* — a dome with a ploughshare with a triangular end (photo by E.V. Khodakovsky, 2019); *b* — plan. Graphic reconstruction at the beginning of the XX century (fig. S.V. Petrova); *c* — the southern facade. Graphic reconstruction at the beginning of the XX century (fig. S.V. Petrova); *d* — the longitudinal section. Graphic reconstruction at the beginning of the XX century (fig. S.V. Petrova)

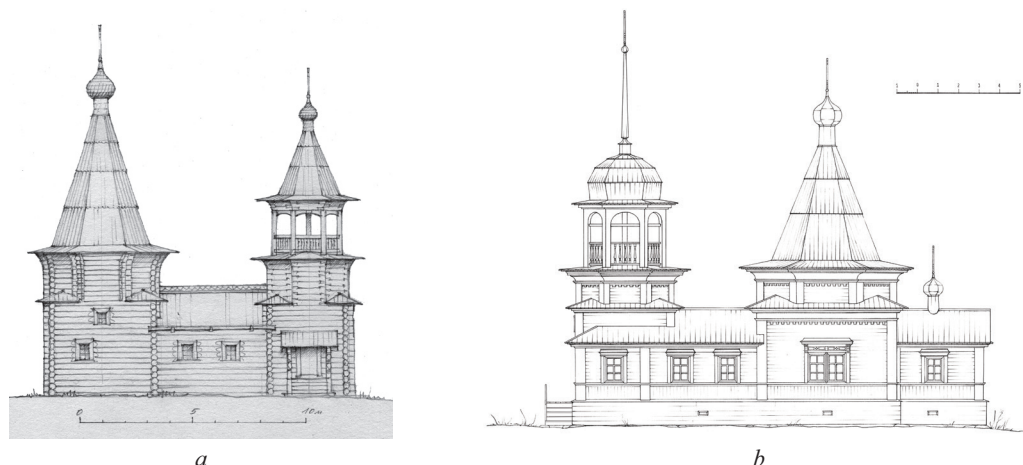


Рис. 4. Часовня Георгия Победоносца XVIII века в д. Большой Бор: *a* — графическая реконструкция (рис. А.Б. Бодэ); *b* — южный фасад. Графическая реконструкция (рис. О.А. Зининой)

Fig. 4. Chapel of St. George the Victorious of the XVIII century in the village of Bolshoy Bor: *a* — graphic reconstruction (fig. A.B. Bode); *b* — the southern facade. Graphic reconstruction (fig. O.A. Zinina)

но о еще одной шатровой часовни, вероятно, устроенной в XVIII в. Надо сказать, что новая церковь Георгия Победоносца, основанная на месте часовни, сохранила схожие с прежними формы храма типа «восьмерик на четверике» с шатровым завершением [15, с. 114] (рис. 4). Церковь Георгия Победоносца была возведена практически полностью из нового материала, поскольку, по историческим сведениям, при разборке часовни не осталось пригодных для строительства элементов [16, л. 16, 17]. Натурные обследования сооружения подтвердили эту информацию [17, с. 15].

Характерной особенностью памятника архитектуры в д. Воймозеро является объемно-пространственная структура храма. Четверик в плане вытянут по продольной оси, при этом завершение выше уровня окон квадратное в плане. Получается двухуровневый потолок в основном объеме храма — под восьмериком выше, под двускатной крышей ниже. Прямо противоположный прием мы наблюдаем у колокольни и паперти Георгиевской церкви в д. Большой Бор — паперть короче колокольни в плане и поэтому «нависает» над трапезной. Нельзя не отметить необычную конструкцию потолка в основном объеме храма, под восьмериком. Она состоит из 4 балок, уложенных перпендикулярно друг другу в одном уровне. Таким образом, образуется девять секций потолка. Еще одна характерная особенность этого памятника архитектуры — паперть и притвор внутри составляют практически единое пространство за счет широкого арочного проема между ними.

Колокольня исследуемого памятника завершена граненым куполом со шпилем. Купол слегка сужается книзу, как луковичная глава. Такая форма является характерной для Нижнего Поонежья [14, с. 276]. Примерами могут служить колокольни 1783 г. (перестроена в 1897 г.) в д. Верховье, церкви Богоявления

Господня 1851–1853 гг. в д. Поле. На сопредельной территории Онежского Поморья можно наблюдать такой же облик завершения на колокольне 1774 г. (перестроена в конце XIX в.) в с. Нименьга, на колокольне 1825 г. в с. Ворзогоры (рис. 5). Очевидно сходство колоколен церкви Великомученицы Параскевы в д. Воймозеро и часовни Смоленской иконы Божией Матери в с. Верховье. Помимо внешнего облика аналогично планировочное решение в части входа



Рис. 5. Завершение колокольни в с. Ворзогоры (фото О.И. Хановой, 2020 г.)

Fig. 5. Completion of the bell tower in the village of Vorzogory (photo by O.I. Khanova, 2020)

на второй ярус. Он устроен не из паперти, а снаружи — через дверной проем на западном фасаде.

Проведенное исследование определило наличие четырех строительных этапов церкви Великомученицы Параскевы. Первоначально это была шатровая часовня с широким притвором, построенная в 1746 г. Затем, в 1864 г., она перестроена в церковь — прирублена апсида. В 1877 г. устроена колокольня над папертью, сделанной до этого. На четвертом этапе, в 1904 г. основана новая колокольня и сделано крыльцо.

Церковь в официальных источниках датируется 1864 г., однако при более детальном изучении выяснилось, что она имеет более древнюю историю. В настоящее время церковь не используется. Техническое состояние таково, что визуально прослеживается просадка основного объема храма относительно других частей здания, которые накрываются в его сторону. Требуется проведение комплексной реставрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Церковь Великомученицы Параскевы — значимый памятник для изучения истории архитектуры Нижнего Поонежья. Это пример уцелевшего типа бывшей крупной деревянной шатровой часовни на данной территории.

Выделено четыре строительных этапа церкви Великомученицы Параскевы:

- 1) 1746 г. — строительство шатровой часовни во имя Великомученицы Параскевы;
- 2) 1864 г. — перестройка часовни в церковь Великомученицы Параскевы с помощью добавления алтарного прируба, с освящением;

3) 1877 г. — устройство колокольни над папертью;

4) 1904 г. — выполнение новой колокольни, пристройка крыльца.

На последний этап формирования внешнего облика церкви Великомученицы Параскевы выполнена графическая реконструкция.

Перспективным развитием рассматриваемой темы может считаться выполнение дендрохронологического исследования элементов сруба сооружения с целью уточнения и подтверждения датировок, известных из архивно-библиографических источников. Также при натурном обследовании возможно применение современных технологий — фотограмметрия, 3D-лазерного сканирования, информационной модели (BIM) [18, с. 1–18] и др. Это позволит получить более точную и всестороннюю информацию об объекте — геометрию, текстуру поверхности [19, с. 2; 20, с. 1]. Однако стоит отметить, что при использовании методов цифровой съемки памятника архитектуры необходимо натурное обследование здания с мерами ручным способом. Это позволяет показать все элементы конструкций, недоступных для сканеров и фотокамер [21, с. 47].

Основное направление дальнейшего исследования заключается в изучении новых памятников храмового деревянного зодчества Нижнего Поонежья XVII – начала XX вв. Цель работы — определение архитектурных особенностей объектов данной местности, а также взаимосвязи с общим ходом развития русского деревянного зодчества. Такая работа актуальна не только для пополнения сведений о памятниках архитектуры для возможных работ по их сохранению, но и для развития туризма в регионе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cao Z., Mustafa M., Isa M.H.M. Regional Architecture Building Identity: The Mediating Role of Authentic Pride // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 4. P. 1059. DOI: 10.3390/buildings14041059
2. Poullain P., Miranda-Santos M., Hilton A., Hamard E., Mouraud C. Sustainable Construction through Tradition: Inventory of Cob Buildings in the Guérande Peninsula (France) // Heritage. 2024. Vol. 7. Issue 9. Pp. 4768–4789. DOI: 10.3390/heritage7090226
3. Bode A. Methods of the Restoration of Wooden Architectural Monuments in Russia // Proceedings of the 2019 International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (АНТИ 2019). 2019. DOI: 10.2991/ahti-19.2019.66
4. Kolesnikova L.I., Aksenov V.V., Brakovenko M.V. Historical and architectural monuments of wooden architecture in the territory of historical settlements in Belgorod region // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 944. Issue 1. P. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/944/1/012017

5. Bode A. Wooden architecture of central Russia : a new Discovery // Proceedings of the 2nd International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (АНТИ 2020). 2020. DOI: 10.2991/assehr.k.200923.003
6. Бодэ А.Б. Древние московские и новгородские корни в деревянном храмовом зодчестве Русского Севера. М. : Прогресс-традиция, 2019. 496 с. EDN UDQUWB.
7. Ходаковский Е.В. Деревянная церковная архитектура Русского Севера XIX – начала XX века: метаморфозы традиции. СПб. : Коло, 2021. 264 с.
8. Кольцова Т.М. Иконы Северного Поонежья : монография. М. : Издательство «Северный паломник», 2005. 352 с.
9. Khodakovsky E., Noskova A. Archives and Historical Documents in Contemporary Research of the Wooden Architecture of the Russian North // Historic Wooden Architecture in Europe and Russia. 2015. Pp. 78–91. DOI: 10.1515/9783035605426-007

10. Краткое историческое описание приходов и церквей Архангельской епархии. Архангельск. Вып. 3: Уезды Онежский, Кемский и Кольский. 1896. 267 с.

11. Архив Государственного автономного учреждения культуры Архангельской области «Научно-производственный центр по охране памятников истории и культуры». Д. 1–675. Научно-проектная документация. Раздел: Историко-архивные и библиографические материалы. Каргопольско-Онежский регион. 1987. Т. II. Шифр 13/6-11, кн. 2в, арх. № 1456.

12. Орфинский В.П., Гришина И.Е. Типология деревянного культового зодчества Русского Севера : монография. Петрозаводск, 2004. 278 с. EDN QNKVFJ.

13. Ковалевская Т.С. Проявления традиции в архитектуре деревянных храмов Архангельской губернии в XIX веке // Деревянное зодчество: новые материалы и открытия. 2020. № 7. С. 198–221.

14. Бодэ А.Б., Жигальцова Т.В., Петрова С.В. Церковь во имя святителя и чудотворца Николая в деревне Сырье // Деревянное зодчество: новые материалы и открытия. 2022. № 8. С. 266–278.

15. Бодэ А.Б., Ковалевская Т.С. Георгиевская церковь в деревне Большой Бор Онежского района Архангельской области // Рябининские чтения – 2023 : мат. IX конф. по изучению и актуализации традиционной культуры Русского Севера. 2023. С. 111–114. EDN XHLJLA.

16. Государственный архив Архангельской области. Ф. 29. Оп. 4. Т. 2. Д. 1949. Дело о дозволении построить церковь вместо часовни в деревне Боровской Чекуевского прихода.

17. Бодэ А.Б., Дятликова Н.В., Ковалевская Т.С., Ханова О.И., Ходаковский Е.В. Ильинская и Георгиевская церкви в деревне Большой Бор. М. : АНО «Традиция», 2023. 24 с. EDN VMKHPK.

18. Zhang J., Wang Z., Wang W. Application of Smart Modelling Framework for Traditional Wooden Architecture // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 7. P. 2130. DOI: 10.3390/buildings14072130

19. Zhan J., Zhang T., Huang J., Li M. Maintenance Approaches Using 3D Scanning Point Cloud Visualization, and BIM+ Data Management: A Case Study of Dahei Mountain Buildings // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2649. DOI: 10.3390/buildings14092649

20. Reinoso-Gordo J.F., Gámiz-Gordo A., Barrero-Ortega P. Digital Graphic Documentation and Architectural Heritage: Deformations in a 16th-Century Ceiling of the Pinelo Palace in Seville (Spain) // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10. Issue 2. P. 85. DOI: 10.3390/ijgi10020085

21. Kantorowicz K. Usage of digital surveying techniques in monuments of wooden architecture. Example of documentation of churches on Silesia and Lesser Poland border // Architectus. 2023. Issue 4 (76). DOI: 10.37190/arc230404

Поступила в редакцию 16 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 30 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Оксана Ивановна Ханова — архитектор-реставратор; Автономная некоммерческая организация Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества «Традиция» (АНО «Традиция»); 109028, г. Москва, Покровский бульвар, д. 16–18; аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9972-0187, РИНЦ ID: 1175498, ORCID: 0009-0009-3026-8693; ano-tradiciya@yandex.ru, khanovaoi@ya.ru.

REFERENCES

1. Cao Z., Mustafa M., Isa M.H.M. Regional Architecture Building Identity: The Mediating Role of Authentic Pride. *Buildings*. 2024; 14(4):1059. DOI: 10.3390/buildings14041059

2. Poullain P., Miranda-Santos M., Hilton A., Hamard E., Mouraud C. Sustainable Construction through Tradition: Inventory of Cob Buildings in the Guérande Peninsula (France). *Heritage*. 2024; 7(9):4768–4789. DOI: 10.3390/heritage7090226

3. Bode A. Methods of the Restoration of Wooden Architectural Monuments in Russia. *Proceedings of the 2019 International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/ahti-19.2019.66

4. Kolesnikova L.I., Aksenov V.V., Brakovenko M.V. Historical and architectural monuments of wooden architecture in the territory of historical settlements in Belgorod region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 944(1):012017. DOI: 10.1088/1757-899X/944/1/012017

5. Bode A. Wooden architecture of central Russia : a new Discovery. *Proceedings of the 2nd International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2020)*. 2020. DOI: 10.2991/assehr.k.200923.003

6. Bode A.B. *Ancient Moscow and Novgorod roots in the wooden temple architecture of the Russian North*. Moscow, Progress-tradition, 2019; 496. EDN UDQUWB. (rus.).
7. Khodakovskiy E.V. *Wooden church architecture of the Russian North of the XIX–early XX century: metamorphoses of tradition*. St. Petersburg, Kolo, 2021; 264. (rus.).
8. Koltsova T.M. *Icons of the Northern Poonezhye : monograph*. Moscow, Publishing house “Northern Pilgrim”, 2005; 352. (rus.).
9. Khodakovskiy E., Noskova A. Archives and Historical Documents in Contemporary Research of the Wooden Architecture of the Russian North. *Historic Wooden Architecture in Europe and Russia*. 2015; 78-91. DOI: 10.1515/9783035605426-007
10. *A brief historical description of the parishes and churches of the Arkhangelsk diocese. Arkhangelsk. Issue 3: Onega, Kemsy and Kola counties*. 1896; 267. (rus.).
11. *Archive of the State Autonomous Cultural Institution of the Arkhangelsk Region “Scientific and Production Center for the Protection of historical and Cultural monuments”*. d. 1-675. *Scientific and design documentation. Section: Historical, archival and bibliographic materials. Kargopolsko-Onega region*. 1987. Vol. II. Cipher 13/6-11, book 2b, arch. No. 1456. (rus.).
12. Orfinsky V.P., Grishina I.E. *Typology of wooden cult architecture of the Russian North*. Petrozavodsk, 2004; 278. EDN QNKVFJ. (rus.).
13. Kovalevskaya T.S. Manifestations of tradition in the architecture of wooden churches of Arkhangelsk province in the XIX century. *Wooden architecture: new materials and discoveries*. 2020; 7:198-221. (rus.).
14. Bode A.B., Zhigaltsova T.V., Petrova S.V. Church in the name of St. Nicholas the Wonderworker in the village of Raw Materials. *Wooden architecture: new materials and discoveries*. 2022; 8:266-278. (rus.).
15. Bode A.B., Kovalevskaya T.S. St. George’s Church in the village of Bolshoy Bor, Onega district, Arkhangelsk region. *Ryabinin readings – 2023 : materials of the IX conference on the study and actualization of traditional culture of the Russian North*. 2023; 111-114. EDN XHLJLA. (rus.).
16. State Archives of the Arkhangelsk Region. F. 29. Op. 4. Vol. 2. D. 1949. *The case of permission to build a church instead of a chapel in the village of Borovskaya of the Chekuyevsky parish*. (rus.).
17. Bode A.B., Dyatlikova N.V., Kovalevskaya T.S., Khanova O.I., Khodakovskiy E.V. *Ilyinskaya and St. George churches in the village of Bolshoy Bor*. Moscow, ANO “Tradition”, 2023; 24. EDN VMKHPK. (rus.).
18. Zhang J., Wang Z., Wang W. Application of Smart Modelling Framework for Traditional Wooden Architecture. *Buildings*. 2024; 14(7):2130. DOI: 10.3390/buildings14072130
19. Zhan J., Zhang T., Huang J., Li M. Maintenance Approaches Using 3D Scanning Point Cloud Visualization, and BIM+ Data Management: A Case Study of Dachei Mountain Buildings. *Buildings*. 2024; 14(9):2649. DOI: 10.3390/buildings14092649
20. Reinoso-Gordo J.F., Gámiz-Gordo A., Barrero-Ortega P. Digital Graphic Documentation and Architectural Heritage: Deformations in a 16th-Century Ceiling of the Pinelo Palace in Seville (Spain). *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021; 10(2):85. DOI: 10.3390/ijgi10020085
21. Kantorowicz K. Usage of digital surveying techniques in monuments of wooden architecture. Example of documentation of churches on Silesia and Lesser Poland border. *Architectus*. 2023; 4(76). DOI: 10.37190/arc230404

Received September 16, 2024.

Adopted in revised form on September 30, 2024.

Approved for publication on October 28, 2024.

BIONOTES: Oksana I. Khanova — architect-restorer; Autonomous non-profit organization Research and restoration of wooden architecture monuments “Tradition”; 16–18 Pokrovsky Boul., Moscow, 109028, Russian Federation; postgraduate student; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9972-0187, ID RSCI: 1175498, ORCID: 0009-0009-3026-8693; ano-tradiciya@yandex.ru, khanovaoi@ya.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72.01

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.361-370

Линейная генетика архитектуры

Валентин Никитович Ткачев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Понятия линейности и нелинейности представляют следствие проекции на архитектуру физических терминов, характеризующих противостояние традиций определенности, статичности, предсказуемости, т.е. «линейности», состояниям неопределенности, динамичности, аperiodичности, т.е. «нелинейности», которая была воспринята архитекторами как сигнал свободы творчества, как знак авангардного протеста против «ортодоксальной», консервативной архитектуры. Выявляется деконструктивная, разрушительная идеология апологетов нелинейности. **Материалы и методы.** С расширением диапазона научного аппарата теории архитектуры и ее связи с другими научными дисциплинами усиливаются процессы взаимного терминологического обмена, вскрывающие аспекты морфогенеза, выпадавшие ранее из внимания теоретиков и практиков архитектуры. Поэтому к методологическим инструментам статьи привлекаются современные концепции философии, физики, биологии, социологии.

Результаты. Исследуются исторические прецеденты, оказавшие опосредованное или непосредственное влияние на ход линейного развития мирового зодчества. Вводятся понятия и термины, входящие в обменный методологический фонд архитектуры, ее включение в «клуб» современного научного знания. Отстаивается концепция линейности архитектуры как феномена универсальной закономерности бытия материи. Рассматриваются явления девиации процессов, их инерционность, бинарные оппозиции диалектики морфогенеза, теоретическое осмысление эволюционных этапов, заблуждения и их критика.

Выводы. Утверждается тезис о линейности как тотальном признаке организованности, завершенности, целесообразности, представляющих синтезировано качество архитектуры как составляющей материального и духовного прогресса цивилизации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эволюция, линейное-нелинейное развитие, инерционность, бинарные оппозиции, диалектика, аналетика, пассионарность, синергетика, ассоциации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ткачев В.Н. Линейная генетика архитектуры // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 361–370. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.361-370

Автор, ответственный за переписку: Валентин Никитович Ткачев, valentintn@mail.ru.

Linear genetics of architecture

Valentin N. Tkachev

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

ABSTRACT

Introduction. The concepts of linearity and nonlinearity represent a consequence of the projection of physical terms onto architecture that characterize the opposition of traditions of certainty, static, predictability, i.e. “linearity”, to the states of uncertainty, dynamism, aperiodicity, i.e. “nonlinearity”, which was perceived by architects as a signal of creative freedom, as a sign of avant-garde protest against “orthodox”, conservative architecture. The deconstructive, destructive ideology of the non-linearity apologists is revealed.

Materials and methods. With the expansion of the range of the scientific apparatus of the theory of architecture and its connection with other scientific disciplines, the processes of mutual terminological exchange are intensifying, revealing aspects of morphogenesis that previously fell out of the attention of architectural theorists and practitioners. Therefore, modern concepts of philosophy, physics, biology, and sociology are involved in the methodological tools of the paper.

Results. The historical precedents that had an indirect or direct impact on the course of the linear development of world architecture are investigated. The concepts and terms included in the exchange methodological fund of architecture, its inclusion in the “club” of modern scientific knowledge are introduced. The concept of the linearity of architecture as a phenomenon of the universal regularity of the existence of matter is defended. The phenomena of deviation of processes, their inertia, binary oppositions of the dialectic of morphogenesis, theoretical understanding of evolutionary stages, misconceptions and their criticism are considered.

Conclusions. The thesis of linearity as a total sign of organization, completeness, expediency, representing the synthesized quality of architecture as a component of the material and spiritual progress of civilization, is argued.

KEYWORDS: evolution, linear-nonlinear development, inertia, binary oppositions, dialectic, analectic, passionarity, synergetics, associations

ВВЕДЕНИЕ

Апология в отечественной архитектурной теории концепции нелинейности и накрываемых этим термином разнообразных стилистических явлений западной архитектурной практики вносит, на взгляд автора, разрушительный импульс как в реальную архитектуру, так и в мышление архитекторов, хорошо информированных о зарубежных событиях.

Учитывая современное положение России, противостоящей открытой агрессии (военной и идеологической) Запада, необходимо провести специальное компетентное исследование такого «культурного обмена» в его роли пятой колонны.

Этот аспект только обозначен в статье, основное содержание которой — другой, по сравнению с бытующими, подход к пониманию принципов линейности-нелинейности с опорой на тезис тотальности, законченности процессов формообразования, которые не должны сохранять знак незавершенности строительства, формальной и функциональной неопределенности, хаотичности художественной образности, демонстрировать эстетическую деградацию.

Неожиданность интереса, вызванного сутью дихотомии «линейность-нелинейность», кроется, кажется, в том, что этот сводный термин обозначил переломный этап в развитии физики — переход от ортодоксальных категорий в изучении физических процессов к исследованию нестабильных, вибрирующих, неопределенных по свойствам явлений, стоящих на пути к познанию истины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основанием для статьи послужила спорная тенденция переноса методологии исследования физических процессов на архитектурный морфогенез.

Термин «нелинейность» оказался удобным для обозначения промежуточных, поисковых стадий процессов. В этом качестве нелинейность закрепились в словаре физиков.

При этом ожидаемым результатом исследования оставался программируемый, точный, описанный формулами, стационарный, сбалансированный, т.е. линейный результат.

Нелинейность в физике все же остается преимущественным признаком, так как изучаемые процессы по большей части находятся в сфере ментального анализа, гипотез и не спешат материализовываться.

Рассмотрение в физике взаимодействий пары линейность-нелинейность в проекции на динамику бытия любой системы обнаруживает следующую технологию контактов, вписанную в последовательность общей работы:

1. Любая система от формирования и распада космических тел Вселенной до конкретных земных

дел «настроена» универсальными законами на линейное развитие как процессов в целом, так и на каждой отдельной его стадии, завершающаяся ощутимым материальным результатом.

2. Морфогенез строится таким образом, что преобладают формы наиболее простых, целесообразных, экономных преобразований, также «заложённых» в программу. Чтобы сохранить темпы развития и поддержать «правильный» выбор действующих средств, а также использовать привходящие внешние воздействия (отклонять вредные и включать полезные) и внутренние возможные отклонения от трассы эволюции, системы обладают средствами защиты и качествами самоорганизации.

3. Внешние контакты могут играть как стабилизирующую, так и разрушительную роль. Сильные негативные воздействия снимают систему с трассы развития, и она становится расходным материалом эволюции [1]. Отметим кстати, что слабые воздействия на линейную устойчивость и итоги эволюции не влияют. «Эффекта бабочки» не существует. А преодолимые препятствия тренируют и закаляют систему [2]. К отклонениям (девиациям) относятся «креативные прыжки» и действия хаотических раздражителей, которые стабилизируются статистическим множеством и работают на укрепление линейности [3].

4. Мерой и залогом всеобщей линейности материальных процессов есть жизнь Вселенной, поняты законы которой постоянны, фрактальны, цикличны, едины в технологии преобразования космической материи и даже закреплёны размерностями (рис. 1). Сама Вселенная неизменна во времени и пространстве, и все происходящие в ней преобразования суть работа вечного двигателя. Представления о нелинейности Вселенной ложны.

Изложенные автором представления гипотетичны не в меньшей степени, что и другие в этой области, и в кантовской аргументации вполне аутентичны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Линейная архитектура

Проекция принципов линейности-нелинейности нашла отражение и в архитектуре.

Популярной стала идеология нелинейности по простой причине: сомнения физиков совпали по хронологии со временем смены архитектурной парадигмы — пришло время авангарда [4–6].

Причем, если в физике нелинейность сопряжена с понятием протяженности процессов или характеристикой еще не установленных закономерностей, то в архитектуре этот термин стал удобной спекуляцией для аргументации признаков нестабильности,

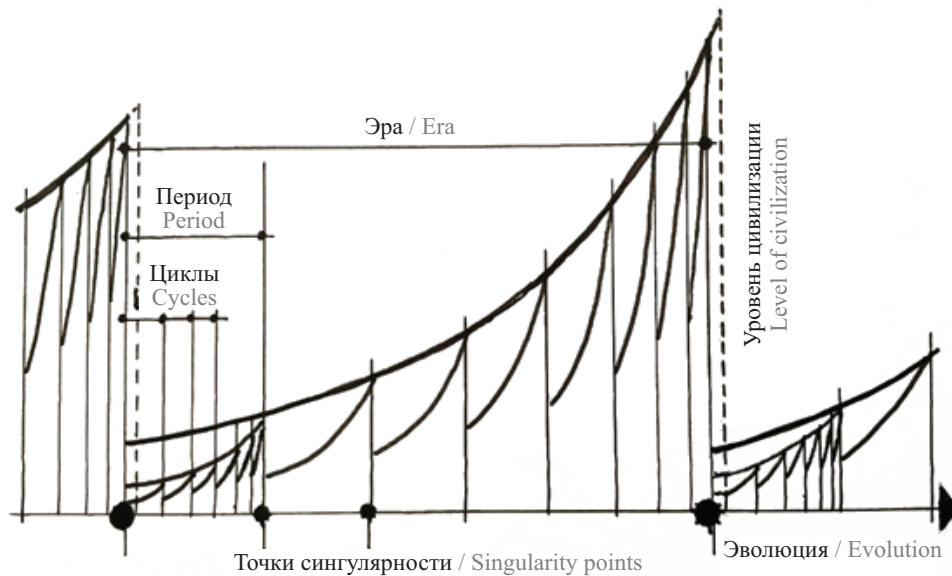


Рис. 1. Эра, периоды и циклы технической цивилизации. Фрактальная эволюция (рисунок автора)

Fig. 1. The era, periods and cycles of technical civilization. Fractal evolution (the author's drawing)

разбалансированности, незавершенности для фактически состоявшейся архитектуры.

Такая подмена понятия вводит в заблуждение теоретиков архитектуры тем, что признаку нелинейности придается метафорический смысл, не очень подходящий для оценки реальной архитектуры, когда предпочитают зримые и соматически внятные качества предметной среды обитания, а не визионерство и иррациональное влияние на психику.

Большинство адептов видит в нелинейности возможность «освежить» мышление архитектора, отвратить его от «чистой геометрии», увести от ортогональности «коробчатой» архитектуры, вникнуть в поэтику зодчества, близкого природе пластичными формами.

И, конечно, наскучили определенность, однозначность, отсутствие эмоциональной интриги в образах зданий, которые сейчас так легко «вылепить», благо отказа в технических возможностях создания любых форм не будет (рис. 2). Выразительность, экстравагантность и даже экзальтированность наконец реализовались экспериментами по тератогенезу [7].

Обозначилось резкое расхождение менталитета архитекторов, имеющих дело с реальной практикой на строительной площадке, и теоретиков, склонных к искусствоведческому анализу происходящих событий. Попытки выявить у практикующих архитекторов интерес и понимание теоретических проблем в архитектуре оказались тщетными.

Резюмируя сложившийся в нашем представлении сценарий взаимодействия линейности и нелинейности в его проекции на архитектуру, сформулируем общий тезис трактовки линейности.

1. В космическом измерении линейность эволюции материи поддерживается постоянством и неизменностью ротации, фрактальности процессов формо-

образования, бесконечно обновляющихся подобно птице Феникс. Фрактальность — один из ведущих принципов формообразования в архитектуре.

2. Сравнительно короткие циклы развертывания во времени и пространстве архитектурных направлений (стилей), составляющие в целом цепь эволюции, соизмеримую со временем существования цивилизации, также линейны в постоянстве своих морфологических признаков (античные ордерные формы, римские распорные системы, готика, Ренессанс...), обозначая символ своей эпохи.

3. Промежуточные фазы линейных циклов представлены необходимыми нелинейными «тонизирующими» компонентами эволюционного процесса. И, если система устойчива по своему происхождению, ее не смогут свернуть с линейной трассы никакие возмущения; более того, они ускоряют и укрепляют линейный морфогенез [8].

Линейное развитие отнюдь не означает безоблачного непрерывного движения к цели.

Напротив, этапы истории реализуются пульсирующим режимом через преодоление препятствий или, наоборот, расслабляющими режимами существования. Утвердившаяся в своей устойчивости и каноничности форм система увядает и не сопротивляется распаду.

Немецкий историк К. Ясперс в своей книге «Смысл и назначение истории» отмечает, что конгломераты «локальных» историй начальных исторических этапов цивилизации в конце концов стягиваются в единую историю к неминуемой консолидации, стабильности. Нигде не упоминая о принципе линейности (этот термин еще не созрел к выпуску его книги в 1948 г.), К. Ясперс утверждает крупномасштабную цикличность линейной человеческой истории, сти-



Рис. 2. Экстравагантная архитектура современности. Фрэнк Гери. Центр Лу Руво в Лас-Вегасе¹

Fig. 2. The extravagant architecture of modernity. The Frank Gehry Lou Ruvo Centre in Las Vegas¹

мулированную ритмичностью и повторяемостью событий цивилизации. В наличии «оси мировой истории» он видит единство и предустановленность ее развития. Выделение «осевого времени» как одного из стимулирующих импульсов мировой пассионарности VIII–II вв. до н. э. фиксирует переход цивилизации от древнейших культур к античности, закрепленный прогрессом архитектуры [9].

К. Ясперс предвидел рождение нового осевого времени.

Может быть, оно уже настает, преодолевая «игровую» фазу современного раскованного творчества? Напряжение между супервыразительностью и целесобразностью в архитектуре достигло предела.

Как иллюстрацию тонизирующего влияния пассионарных процессов на линейное развитие архитектуры приведем примеры из истории, для отдельных ее этапов истоки морфогенеза остались малозаметными.

Когда крестоносцы с XI в. пытались закрепиться на малоазийских берегах Средиземного моря, в строительной деятельности они воспользовались достижениями сирийской архитектуры; опыт был перенесен в практику основания христианских монастырей Европы. От клюнийской школы опыт возведения циркульных и стрельчатых конструкций перенесен в романскую и готическую архитектуру Франции. На логике этого заимствования настаивал Э. Виолле-ле-Дюк.

Зародилась бы без этого опыта готическая архитектура? Наверное, но с опозданием; трансляция ажурных исламских арабесок и стрельчатых сводов в европейскую архитектуру была неизбежной (рис. 3).

Еще одним феноменом воздействия арабской пассионарности на европейскую культуру стало сломенное в 1453 г. сопротивление Византии туркам-сельджукам, захватившим Константинополь благодаря незначительной оплошности осажденных (или предательства, как некогда случилось с Вавилоном) — малозаметного прохода в стене хорошо укрепленной стены.

Крушение Восточной Римской империи вызвало массовую интеллектуальную миграцию в Европу и дало мощный стимул Возрождению, в том числе и архитектурному (рис. 4).

Случилось некое подобие эффекта бабочки.

А Китай до XVI в. оставался закрытой страной, хотя были организованы масштабные морские экспедиции для изучения окрестных стран южных морей, выявления полезности контактов с ними. В истории Китая мог бы возникнуть стимул нелинейного развития. Но сведения были расценены как отрицательные, и китайская архитектура осталась линейной в чистом виде, как в свое время древний Вавилон и Египет, изолированный от окружающего мира вплоть до нашествия гиксосов.

¹ Центр Лу Руво в Лас-Вегасе. URL: <https://i.pinimg.com/originals/28/41/d5/2841d5f683c4ca360c04f86f456abe9c.jpg>



Рис. 3. Образы готики. Миланский собор²

Fig. 3. Images of Gothic. Milan Cathedral²



Рис. 4. Архитектура Возрождения. Церковь Иль-Джезу в Риме. Архитектор Д. Виньола³

Fig. 4. Renaissance Architecture. The Church of Il Gesu in Rome. Architect D. Vignola³

Равномерности и неизменности линейной эволюции сопутствует понятие инерционности, консервации культурных событий во времени.

Инерционность

Инерционность — тактика линейной архитектуры. В начале стадии проектирования намечается ге-

² Миланский собор. URL: https://stroyfora.ru/download/content/202203/22/14/image_6239ae5e212fa9.21934650.jpg

³ Церковь Иль-Джезу в Риме. Архитектор Д. Виньола. URL: https://stroyfora.ru/download/content/202203/22/14/image_6239ae5e212fa9.21934650.jpg

неральный код замысла, суть и образность которого авторы стремятся довести до завершения, «пользуясь линейкой», оберегая от внешних влияний или укладывая их в общую копилку идей.

Стабилизирующая роль инерционности содействовала сохранению архетипа ордера, закреплению монополии конструктивных находок масонов в готике.

Механизм преодоления инерционности как ощущение истощенности тектонических и образных ресурсов — импульсы разрядки социального напряжения, накапливающего застой во всех сферах общественного бытия. То есть периодические всплески обновления — это нормальное явление ритмов жизни; в пространстве между ними общество отлаживает необходимые внутренние связи и иерархии, восстанавливая свой статус.

На инерции мышления основаны достаточно постоянные нормы в образе жизни, этике, эстетике, архитектурных формах. Негативное отношение апологетов постоянного обновления к консерватизму форм культуры уравнивается осознанием предпочтения плавности изменений, соизмеримых с чередованием поколений.

Тенденции к сохранению инерционных форм социальной структуры — залог социально-политической стабильности, выгодной государству, его элите.

Не раз отмечалось, что феномен сопротивления новому свойствен человечеству. Хотя нередко идеологические мотивы революций сопряжены с возвращением к старым добрым временам.

В архитектуре долгое время оставались непризнанными и нереализованными смелые по тектонике и образности проекты А. Лабруста, Й. Утциона, О. Нимейера, Ш. Ле Корбюзье.

Большой потерей для архитектурного прогресса стало торможение практического использования металлического каркаса, разработанного и успешно применяемого американским инженером Дж. Богардом в середине XIX в. Обозначившая новую эру в строительной технологии находка оказалась невосребованной до середины XX в. [10].

Присутствующая в архитектуре имеющегося сооружения завершенность, функциональная целесообразность и гармония образа, вписанность в среду достойна определения линейности.

Процесс осуществления тоже должен быть линейным, но не непрерывным, а допускающим и даже предполагающим пульсирующие циклы экспоненциального развития, завершаемые разрядкой напряжения от «перегрева эволюции», распадом сложившихся «деталей» отработанного агрегата и началом отсчета нового цикла. Эта ритмичность свойственна любым эволюционирующим процессам, начиная с космических.

Эволюция как признак общего развития существует в ментальности людей любой профессии в качестве виртуальной реальности, осуществление

которой опирается на такие же виртуальные категории структуры процессов, технологии взаимодействия их составляющих. К качественным категориям эволюции архитектуры как социального явления — линейности-нелинейности, инерционности — добавляется формула трансляции креативных идей, формирующих предметно-пространственную сущность архитектурного замысла. Эта формула заложена в локальные операции ассоциативного мышления, сопоставляющего попарно варианты контуров будущего проекта. Режим смыслового взаимодействия вариантов мышления по поводу содержания какого-либо объекта или явления сложился еще в пору античности в виде бинарных оппозиций, предлагаемых Сократом своим слушателям на улицах Афин и укрепившихся постепенно в философии как метод познания мира [11–13].

Бинарные оппозиции

Механизм креативного действия бинарной оппозиции состоит во взаимодействии пары элементов, входящих в общую таксономическую группу (по смысловой связи) на принципах синтеза качеств или, напротив, взаимоисключения, но в любом случае создается третья сущность, результирующая диалектическую поляризацию с расчетом на извлечение пользы из сопоставления. В архитектуре это вариантное проектирование.

Исторически сложилось несколько типов взаимодействия полярных элементов бинарной оппозиции, выражающих позитивный или негативный характер их «производственных» отношений от нейтрального позиционирования в виде дихотомии — деления целого на две части взаимоисключающих качеств (искусство реализма — абстракционизм). В так называемой «дихотомии Демокрита» заложена идея бесконечной бифуркации, предвосхищая фрактальную теорию Б. Мандельброта, подтверждающую изоморфизм космоса и архитектурных композиций.

Диполем обозначена противопоставленность электрических зарядов; в метафорическом смысле он усиливает выразительность сопоставляемых вариантов решения, как и дуализм.

Диалектика — центральное понятие философии в изучении общих закономерных связей материи в ее развитии. По Сократу «это искусства диалога, постижения истины путем противоборства мнений».

Аналектика, в отличие от диалектики, ориентирована на позиционирование содружества, движение полярных элементов «в одной упряжке», минуя соперничество, т.е. избавляя линейность развития от ненужных нелинейных инвазий [14, 15]. Помощь придет от теории рисков.

Установление составляющих элементов (понятий, агентов, начал, резидентов) предполагает их взаимодействие для выявления по крайней мере оснований появления третьего — результирующего. Результирующее может иметь разные градации завершенности, в нелинейной «изобразительной»



Рис. 5. Архитектурный тератогенез. Архитектор В. Энрич⁴

Fig. 5. Architectural teratogenesis. Architect V. Enrich⁴

архитектуре эффект незавершенности используется как художественный прием (рис. 5).

Эффект взаимодействия пар устанавливается в меру созревания представлений о таксономическом родстве реагентов (тетива — стрела, обжиг — керамический сосуд, цемент + стальная сетка = армоцемент).

В истории изобретательства, к которому имеет отношение и архитектура, природа молча предлагала варианты решений, но человек долго был недодатлив, прежде чем изобрел, например, арку [16, 17].

Автор полагает архитектуру феноменом линейного развития, рассматривая ее в целом как объект реализации высших универсальных закономерностей, постоянных по своему действию: это гравитация, фрактальность морфогенеза, синусоидальность и цикличность периодов развития — аргументирующие и закрепляющие инерционность типологии и стилистики, плавно меняющих морфологию и скорость преобразований [18, 19].

Архитектура покидает сферу аристократических профессий, ветер перемен дует в сторону обезличенной индустриальности, унификации, деловой организации среды широкого диапазона охвата (от личного пространства до инженерных комплексов планетарного масштаба), без акцентирования эстетической составляющей — она становится естественной гранью оценки качества сооружения. Это логика цивилизационного процесса [20].

До настоящего времени большая часть забот по созданию художественного образа исходила из эстетики ручного труда, которая «линейно» пере-

носила на индустриальные формы, что и послужило поводом возмущения адептов нелинейной архитектуры, предпочитающих освобождение «от оков привычной структуры».

«Тривиальная» архитектура сохраняет деликатную скромность внешнего облика за исключением экстравагантных экспериментов, «вызывающих огонь на себя», скульптуроподобных сооружений и артефактов (рис. 6).

Современный горожанин давно уже обладает развитым ассоциативным мышлением и легко домысливает образ произведения по авторским намекам [21].

«Износ» пока еще действующей парадигмы жизни привлекает новые силы преобразований, но все они вписаны в линейную логику цикличности; на всем протяжении повторяющегося процесса «нашей» эры человек включен как вспомогательный мыслящий компонент, решающий задачи собственной адаптации к меняющемуся миру в роли «коллективного бессознательного», придерживаясь инерционности мышления, консерватизма запросов, привыкания к жестким антигуманным силуэтам новостроек XXI в.

Между тем внешняя образность как объект внимания архитекторов теряет актуальность, интерес к познанию среды смещается к дизайну внутренних пространств, игнорируя историческую привлекательность городского культурного ландшафта. Это знак психологического переключения на интерьерное мышление в восприятии пространства, который

⁴ URL: https://naked-science.ru/wp-content/uploads/2016/04/article_10_2.jpg



Рис. 6. Скульптура швейцарского художника Урса Фишера «Большая глина № 4» на Болотной набережной в Москве (фото автора)

Fig. 6. Sculpture by Swiss artist Urs Fischer “Big Clay No. 4” on Bolotnaya Embankment in Moscow (photo by the author)

почувствовали архитекторы, обратившись к «земляному» зодчеству.

Эволюция процессов организации среды современных городов неминуемо ведет к гибридизации форм освоения их территории, дезорганизации с преобладанием нелинейного начала и вводом в социальные контакты конвенциональных режимов общения страт. В программе структурных изменений возник

кает раздел переноса теоретических исследований по психологическому воздействию на обитателей в градостроительную практику. Стихийная логика формирования социальных страт приводит к самосегрегации в зонировании и формах расселения, тем более что пришел конец устойчивой демографии, расширяется коллекция этнического и социального состава постоянных и транзитных жителей, умножается число религиозных объектов разных конфессий [22].

Пора покончить с заблуждениями и спекуляциями относительно коэволюции живой природы и технической цивилизации, колеи их существования давно разошлись. Лучшим вариантом сосуществования, как показало недавнее осветление рек с прекращением деятельности загрязняющих среду промпредприятий, будет соседство первой и второй природы по охраняемым границам гомеостазиса.

«Непопадание» результатов реализации отдельных объектов в хронологию линейной архитектуры выражено традиционным парадоксом: проектировали будущее, а построили прошлое — избежать его удается немногим.

Но асинхронность лечится временем адаптации, когда впечатления неуместности консервативных или авангардных форм сглаживаются.

К виду здания «Наутилус» в Москве тоже привыкнут, и оно уже стало объектом внимания туристов к городским причудам (рис. 7).

Хотя можно предполагать, что его авторы средствами бинарного сопоставления «родственных» образов надеялись вызвать стилистическую перекличку с ансамблем Метрополя, а это не все поняли. Важно, конечно, чтобы связанные метафизическим единством объекты «говорили» на одном языке и этот язык понимали обитатели.

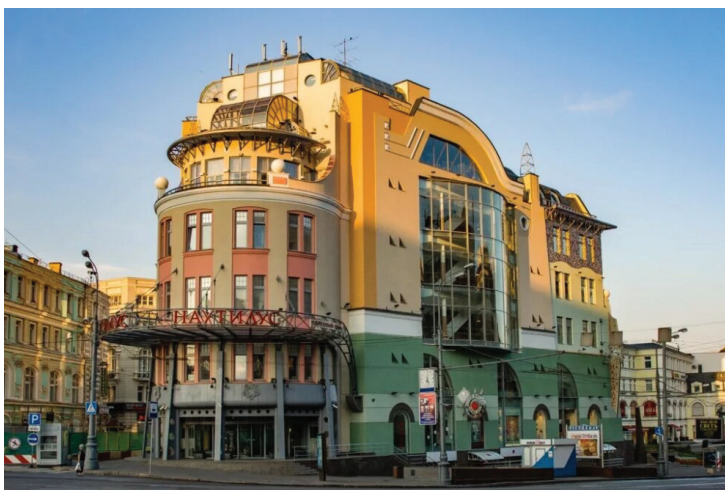


Рис. 7. ТЦ «Наутилус» на Лубянке — стилистическая пара зданию Метрополя. Архитектор А. Воронцов⁵

Fig. 7. Nautilus shopping centre in Lubyanka street is a stylistic pair to the Metropol building. Architect A. Vorontsov⁵

⁵ ТЦ «Наутилус» на Лубянке. URL: https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen_doc/118604/pub_62f764bbf13e4403a56208bb_62f769a8cfaabe473af207a3/scale_1200

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Линейность как тотальный признак организованности, целесообразности, завершенности — естественное качество архитектуры как составляющей материального и духовного прогресса цивилизации. Ее линейность встроена в общий универсальный режим существования материи в любом масштабе и форме проявления.

Рабочая архитектурная модель линейности заимствована из физики, у которой свои счеты с конкретными представлениями о мире, опирающимися практически только на гипотезы и существующими в процессе изучения, исповедуя принципы нелинейности.

Архитектура — материальная среда, и размежевание обновляемой (синхронно другим видам деятельности) архитектурной теории, интерпретирующей идеологию декаданса западной философии, и реальной архитектуры стало очевидным.

Нелинейность была на ура воспринята как папорт в мир обновления, поэзию метафор, архитек-

тура перестала восприниматься «как заложник бурно развивающейся строительной индустрии» и обратилась к «свободе творчества».

Достижения нелинейной архитектуры восхищали. Но прошло немного времени и творческие муки мэтров авангарда сегодня уже воспринимаются с ироничным пафосом.

В меру возможностей и осмысления информации автор отстаивает линейную концепцию архитектуры как феномена конструктивной, функциональной и эстетической определенности, не издаваемой над логикой тектоники и строительного искусства и избавляющейся от комплиментов тератогенезу.

Неестественное расхождение высокого технического уровня строительной индустрии и шаловливости творческих замыслов в архитектуре пора преодолевать.

И это задача архитектурной теории, поставленная современностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Северцов А.Н. Морфологические закономерности эволюции. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1939. 610 с.
2. Назаретян А.П. Нелинейное будущее. М. : Аргмак-медиа, 2017. 508 с.
3. Нельке М. Техники креативности. М. : Smart-Book, 2009. 144 с.
4. Добрицына И.А. От постмодернизма — к нелинейной архитектуре. М. : Прогресс-Традиция, 2004. 413 с.
5. Капустин П. Нелинейность развития и ее линейные проекции // Проект Байкал. 2022. Т. 19. № 72. С. 36–45. DOI: 10.51461/projectbaikal.72.1976. EDN TQKNIO.
6. Гаевская З. Будущее нелинейной архитектуры // Проект Байкал. 2020. Т. 17. № 66. С. 132–136. DOI: 10.51461/projectbaikal.66.1730. EDN RWVZXS.
7. Салингарос Н.А. Анти-архитектура и деконструкция: триумф нигилизма. М. ; Екатеринбург : Кабинетный ученый, 2017. 295 с.
8. Хайтун С.Д. Социум против человека: законы социальной эволюции. М. ; URSS, Ленанд, 2006. 333 с.
9. Ясперс К. Смысл и назначение истории. М. : Республика, 1991. С. 32–50.
10. Гидион З. Пространство, время, архитектура. М. : Стройиздат, 1984. 455 с.
11. Бакулина А.В. Принцип двоичности в природе и культуре // Вестник Вятского государственного гуманитарного университета. 2008. № 2–1. С. 170–172. EDN JVTFTV.
12. Блох М.Я. Теоретические основы грамматики. М. : Высшая школа, 2004. EDN QQTWPV.
13. Готт В.С. Диалектическое единство линейности и нелинейности // Философские вопросы современной физики, 1988.
14. Буряк А.А. Аналектика парных оппозиций. М., 2007.
15. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М. : Институт компьютерных исследований, 2002. 654 с.
16. Лосев А.Ф. История античной эстетики. М. : Искусство, 1969. 715 с.
17. Николаева Е.В. Фрактальные уровни и паттерны культуры // Вопросы культурологии. 2013. № 11. С. 55–59. EDN RPQRYF.
18. Глейк Дж. Хаос: Создание новой науки. СПб. : Амфора, 2001. 396 с.
19. Фейгенбаум М. Универсальность поведения нелинейных систем // Успехи физических наук. 1983. Т. 141. № 2. С. 343–374.
20. Куракин А.Л. Фундаментальная наука и проблема выживания человечества : научно-аналитический обзор. М. : ИНИОН, 1996. 67 с.
21. Ткачев В.Н. Тератогенез в архитектуре // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 3. С. 64–72. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-64-72. EDN KKVGT.
22. Фесенко Д.Е. Архитектура как инструмент конструирования будущего. М. : URSS, 2018. 399 с.

Поступила в редакцию 11 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 15 января 2025 г.

Одобрена для публикации 28 января 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Валентин Никитович Ткачев** — доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры Института архитектуры и градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-5434-6785; valentintn@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Severtsov A.N. *Morphological patterns of evolution*. Moscow ; Leningrad, Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1939; 610. (rus.).
2. Nazaretyan A.P. *Nonlinear future*. Moscow, Argamak-media, 2017; 508. (rus.).
3. Nelke M. *Techniques of creativity*. Moscow, SmartBook, 2009; 144. (rus.).
4. Dobritsyna I.A. *From postmodernism to nonlinear architecture*. Moscow, Progress-Tradition, 2004; 413. (rus.).
5. Kapustin P. The nonlinearity of development and its linear projections. *Project Baikal*. 2022; 19(72):36-45. DOI: 10.51461/projectbaikal.72.1976. EDN TQKNIO. (rus.).
6. Gaevskaya Z. The future of non-linear architecture. *Project Baikal*. 2020; 17(66):132-136. DOI: 10.51461/projectbaikal.66.1730. EDN RWVZXS. (rus.).
7. Salinger N.A. *Antiarchitecture and deconstruction: the Triumph of Nihilism*. Moscow ; Yekaterinburg, Cabinet Scientist, 2017; 295. (rus.).
8. Haytun S.D. *Society against man: laws of social evolution*. Moscow ; URSS, Lenand, 2006; 336. (rus.).
9. Jaspers K. *The meaning and purpose of history*. Moscow, Republic, 1991; 32-50. (rus.).
10. Gidion Z. *Space, time, architecture*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 455. (rus.).
11. Bakulina A.V. The principle of duality in nature and culture. *Herald of Vyatka State University*. 2008; 2-1:170-172. EDN JVTFTV. (rus.).
12. Bloch M.Ya. *Theoretical foundations of grammar*. Moscow, Higher School, 2004. EDN QQTWPV. (rus.).
13. Gott V.S. Dialectical unity of linearity and nonlinearity. *Philosophical questions of modern physics*. 1988. (rus.).
14. Buryak A.A. *Analectics of paired oppositions*. Moscow, 2007. (rus.).
15. Mandelbrot B. *Fractal Geometry of Nature*. Moscow, Institute of Computer Research, 2002; 654. (rus.).
16. Losev A.F. *History of ancient aesthetics*. Moscow, Iskustvo, 1969; 715. (rus.).
17. Nykolaeva E.V. Fractal levels and culture patterns. *Issues of Cultural Studies*. 2013; 11:55-59. EDN RPQRYF. (rus.).
18. Gleick J. *Chaos: Creating a New Science*. St. Petersburg, Amphora, 2001; 396. (rus.).
19. Feigenbaum M. Universality of the behavior of nonlinear systems. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1983; 141(2):343-374. (rus.).
20. Kurakin A.L. *Fundamental Science and the Problem of Human Survival : a Scientific and Analytical Review*. Moscow, INION, 1996; 67. (rus.).
21. Tkachev V.N. Teratogenesis in architecture. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 3:64-72. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-64-72. EDN KKV GAT. (rus.).
22. Fesenko D.E. *Architecture as a tool for constructing the future*. Moscow, URSS, 2018; 399. (rus.).

Received October 11, 2024.

Adopted in revised form on January 15, 2025.

Approved for publication on January 28, 2025.

BIONOTES: **Valentin N. Tkachev** — Doctor of Architecture, Professor of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5434-6785; valentintn@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.03

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.371-380

Применение ингибиторов тепла гидратации цемента для борьбы с термическим трещинообразованием в массивных бетонных конструкциях

Нгуен Чонг Чык¹, Хоанг Куок Лонг¹, Ле Ван Хунг¹, Николай Алексеевич Анискин²

¹ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона; г. Ханой, Вьетнам;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема температурного трещинообразования вследствие гидратации цемента в массивных бетонных конструкциях привлекает внимание многих отечественных и зарубежных ученых. В настоящее время существует множество мероприятий по предотвращению образования температурных трещин при твердении бетона. Можно разделить их на два основных класса. Первый — это технологические мероприятия в процессе строительства. Второе направление связано с оптимизацией состава бетона, в том числе с использованием различных добавок. Одним из видов таких добавок являются ингибиторы тепловыделения цемента. Их использование позволяет снизить тепловыделение от гидратации цемента на ранней стадии твердения бетона. Это в значительной мере снижает риск образования температурных трещин. Метод — достаточно новый и полностью не исследован на сегодняшний день.

Материалы и методы. На основе метода конечных элементов (МКЭ) выполнена оценка влияния добавки ингибитора понижения тепла гидратации цемента (ИПТ) на вероятность образования термических трещин при бетонировании массивных бетонных конструкций. Выполнены расчеты температурного режима и термонапряженного состояния бетонного массива после его возведения. Рассматривались два варианта состава бетонной смеси: обычный состав без использования ингибитора и состав с добавлением ингибитора тепла гидратации. Численные исследования проведены на базе МКЭ с применением программного комплекса Midas Civil 2019.

Результаты. В результате численных решений для двух вариантов составов бетона получено распределение температуры и температурных напряжений в возведенном бетонном массиве. Дана оценка риска температурного трещинообразования.

Выводы. Ингибиторы понижения теплоты гидратации эффективны для снижения температуры гидратации в массивных бетонных конструкциях. При добавлении 1 % ИПТ от веса цемента при строительстве массивных бетонных конструкций значительно снижается риск появления термических трещин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ингибитор понижения температуры (ИПТ), максимальная температура, температурное поле, бетонный массив, гидратация цемента, температурная трещина

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чык Н.Ч., Лонг Х.К., Хунг Л.В., Анискин Н.А. Применение ингибиторов тепла гидратации цемента для борьбы с термическим трещинообразованием в массивных бетонных конструкциях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 371–380. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.371-380

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Анискин, aniskin@mgsu.ru.

Application of cement hydration heat inhibitors to control thermal cracking in massive concrete structures

Nguyen Trong Chuc¹, Hoang Quoc Long¹, Le Van Hung¹, Nikolay A. Aniskin²

¹ Le Quy Don Technical University; Hanoi, Vietnam;

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

ABSTRACT

Introduction. The problem of temperature cracking due to cement hydration in massive concrete structures attracts the attention of many domestic and foreign scientists. At present, there are many measures to prevent the formation of tempera-

ture cracks during concrete hardening. It is possible to divide them into two main classes. The first one is technological measures in the process of construction. The second direction is related to the optimization of concrete composition, including the use of various additives. One type of such additives are cement heat release inhibitors. Their use makes it possible to reduce heat release from cement hydration at the early stage of concrete hardening. This greatly reduces the risk of thermal cracking. The method is quite new and has not been fully investigated to date.

Materials and methods. In this work, the influence of cement hydration heat inhibitor addition on the probability of thermal cracks formation during the concreting of massive concrete structures was evaluated using the finite element method. Calculations of the temperature regime and thermal stress state of the concrete mass after its erection were carried out. Two variants of concrete mixture composition were considered: the usual composition — without the use of inhibitor and the composition with the addition of heat of hydration inhibitor. Numerical studies were carried out on the basis of the finite element method using the Midas civil 2019 software package.

Results. As a result of numerical solutions for two variants of concrete compositions, the distribution of temperature and temperature stresses in the erected concrete mass was obtained. The risk assessment of temperature cracking is given.

Conclusions. Heat of hydration reduction inhibitors are effective in reducing the hydration temperature in massive concrete structures. The addition of 1 % TRI of cement weight in massive concrete structures significantly reduces the risk of thermal cracking.

KEYWORDS: Temperature reduction inhibitor (TRI), maximum temperature, temperature field, concrete mass, cement hydration, temperature crack

FOR CITATION: Chuc N.T., Long H.Q., Hung L.V., Aniskin N.A. Application of cement hydration heat inhibitors to control thermal cracking in massive concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):371-380. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.371-380 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Aniskin,, aniskin@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Массивными бетонными конструкциями в соответствии с определением¹ называют конструкции, для которых отношение поверхности, открытой для ее высыхания, м², к ее объему, м³, равно или меньше 2. По определению Американского института бетона² массивной следует считать любую конструкцию с размерами достаточно большими, чтобы принимать во внимание величину выделившегося тепла при гидратации цемента для минимизации образования температурных трещин. На практике массивной бетонной конструкцией считают такую, в которой объем уложенного в опалубку бетона хотя бы в одном направлении имеет геометрический размер не менее 1 м. К массивным бетонным сооружениям можно отнести бетонные плотины, шлюзы, опоры мостов и эстакад, фундаменты под крупные сооружения и тяжелое оборудование, массивные колонны, подпорные стены и т.д.^{1,2} [1].

В первые сутки после укладки бетона температура внутри бетонного массива значительно повышается из-за процесса гидратации цемента. При увеличении температуры бетонный блок имеет тенденцию расширяться, что вызывает появление сжимающих напряжений. Поскольку модуль упругости в начальный период твердения бетона относительно мал, а ползучесть велика, сжимающие напряжения из-за роста температуры незначительны по величине. После достижения максимального разогрева следует процесс постепенного охлаждения массива. Понижение температуры бетонного блока вызывает тенденцию его уменьшения в объеме. К этому моменту бетон до-

стигает большого модуля упругости и имеет малую ползучесть. Деформации конструкции ограничены, и это приводит к появлению в бетонном массиве растягивающих напряжений. Превышение этих напряжений величины прочности материала на растяжение ведет к появлению температурных трещин [2, 3]. Чем выше температура разогрева бетона вследствие гидратации цемента, тем выше вероятность температурного трещинообразования. Как показали исследования [4], нагрев бетона может повлиять на долговечность бетонных конструкций в том случае, если максимальная температура разогрева массива превышает ~68–74 °С или разница температур между центром и внешней поверхностью массивных бетонных конструкций превышает 20–25 °С. Это вызывает необходимость принятия мер по ограничению теплоты гидратации в массивном бетоне [5–7].

Процесс гидратации цемента проходит 5 этапов: стадию растворения, гелеобразования и развития структуры, развития начальной прочности, фазу продолжающейся реакции и повышенной интенсивности, фазу долгосрочной стабилизации и зрелости. С целью изменения некоторых процессов и свойств бетонной смеси перед замешиванием или в ее процессе в определенной дозировке (не более 5 % от массы цемента) вводятся химические добавки³. Обычные добавки для бетона включают суперпластификаторы, замедлители схватывания, быстротвердеющие агенты. Вместе с достижением желаемых свойств бетона они влияют на термодинамический процесс бетона на стадиях термогидратации по разным механизмам [8].

¹ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

² ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete.

³ TCVN 8826:2011. Chemical additives for concrete, 23 p. [Технический национальный стандарт Вьетнама TCVN 8826–2011. Химические добавки для бетона. Вьетнам, Ханой. С. 23].

Ингибитор понижения тепла гидратации цемента (ИПТ), являющийся относительно новым типом добавки к бетону, может замедлить скорость выделения тепла в результате реакции гидратации цемента, не влияя на общее количество тепла⁴. В последние годы он применялся в некоторых строительных проектах [9, 10].

Использованные ИПТ были получены путем кислотного гидролиза кукурузной или рисовой муки и содержали в основном гидроксильные кислотные соли и минералы [9–13]. Исследования показали, что добавление ИПТ в бетон снижает риск температурного трещинообразования за счет уменьшения скорости выделения тепла цементом на стадии ускоренного гидратационного процесса [14–17].

Принцип действия добавки ИПТ заключается в том, что она постепенно растворяется в щелочном растворе, образуя в процессе гидратации цемента, адсорбируется на поверхности цементных частиц и их гидратационных продуктов. Процесс растворения происходит достаточно медленно, что помогает замедлить скорость выделения тепла гидратации цементных частиц. Это в конечном счете помогает достичь цели по снижению максимальной температуры в конструкции монолитного бетона.

Добавка ИПТ замедляет схватывание бетона и отличается от замедляющих добавок. Добавки, замедляющие схватывание, главным образом удлиняют время процесса на стадии формирования геля и развития структуры в ходе гидратации цемента. Тем самым замедляется тепловыделение и отодвигается во времени момент возникновения максимальной температуры разогрева бетонного массива. Однако на следующем этапе формирования структуры бетона процесс гидратации продолжается быстрее и максимальная температура может повыситься по сравнению с вариантом бетона без использования замедляющей добавки. Поэтому обычные замедлители схватывания не решают большинство проблем, связанных с образованием температурных трещин.

Количество ингибитора понижения температуры, добавляемое при изготовлении бетона, влияет на степень снижения и скорость набора максимальной температуры бетонной конструкции. С увеличением содержания добавки ИПТ эти параметры уменьшаются. В то же время в процессе гидратации при использовании ИПТ образующийся C-S-H (гидратированный силикат кальция — $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) остается очень стабильным и не поддается влиянию добавки. Поэтому конечная прочность бетона изменяется незначительно³. Как и для других химических добавок, количество добавки ИПТ зависит от конкретного продукта и рекомендуется производителем⁴.

⁴ JC/T 2608-2021. Concrete hydration temperature rise inhibitor [Технический стандарт Китая JC/T 2608–2021. Ингибитор повышения температуры гидратации цемента. КНР, Пекин].

Многие исследования подтвердили эффективность добавки ИПТ при ее добавлении в бетонную смесь. Так, в работе [9] изучалось воздействие ингибитора понижения тепла на основе крахмала на процесс гидратации цемента при его различных дозах: 0,2; 0,4; 0,6 % от веса цемента.

Результаты показали снижение максимальной температуры разогрева с 35,9 (вариант без добавки ингибитора) до 34,7 °C при 0,2 % добавки, 31,8 °C при 0,4 % добавки и 24,9 °C при 0,6 % добавки. Кроме того, увеличение содержания добавки ИПТ привело к уменьшению скорости повышения температуры на стадии ускорения гидратации и скорости охлаждения конструкции после набора максимальной температуры, что является важным фактором для контроля температурных трещин [9].

В работе [14] добавка ИПТ использовалась в экспериментах с концентрациями 0; 0,2; 0,4 и 0,6 % от веса цемента для конструкций толщиной 1,2 м. Результаты экспериментов показали, что при содержании добавки ИПТ 0,6 % от веса цемента максимальная температура снижалась примерно на 11,0 %, а максимальное растягивающее напряжение — на 11,7 %, что эффективно предотвращало появление температурных трещин [14].

В аналогичных исследованиях [17] рассматривался процесс гидратации и изменение механических свойств бетонной смеси с различным содержанием добавки ИПТ в интервале от 0 до 1,0 %. Максимальная скорость повышения температуры смеси с использованием 1 % ИПТ была на 36,3 % ниже, чем у смеси без добавки. Добавка ИПТ ингибирует процесс гидратации цементного раствора в основном в течение 7 дней, что приводит к снижению начальной прочности смеси на 43,4 %. Однако с течением времени разница в прочности уменьшается и ИПТ способствует увеличению прочности на поздних стадиях после 28 дней.

Результаты аналогичных исследований по изучению воздействия добавки ИПТ с различным содержанием на повышение температуры, прочность и свойства бетонной смеси с использованием полевых экспериментов изложены в труде [10]. В результате экспериментов определено оптимальное содержание добавки ИПТ. Экспериментальные исследования проводились для контроля трещин на стенах туннелей, заливаемых бетоном на месте. В ходе исследования установлено, что оптимальное содержание добавки ИПТ составляет 1 % от массы цемента. При добавлении 1 % добавки ИПТ в бетонную смесь для стен туннеля максимальное повышение температуры снизилось, а время достижения пиковой температуры было замедлено. В итоге на стенах туннеля трещины не зафиксированы.

В данной работе авторы используют результаты ранее проведенных экспериментов по тепловыделению состава бетона с добавкой ингибитора понижения температуры гидратации цемента [18]. С применением численного метода конечных элементов (МКЭ) получены результаты решения температурной

задачи и задачи по определению термонапряженного состояния для условий Вьетнама. Численные исследования выполнены на основе МКЭ с использованием программного комплекса (ПК) Midas Civil 2019.

Осуществлено сравнение результатов для двух вариантов бетона: без добавления и с добавлением ИПТ. Сделана оценка вероятности возникновения температурных трещин в ранний период твердения бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Изучалось влияние добавки ИПТ на максимальную температуру и риск образования трещин в возводимом бетонном фундаменте размерами 6 × 12 × 3,6 м. Расчетная схема бетонного блока и частью прилегающего основания представлена на рис. 1. С использованием симметрии бетонного блока с основанием рассматривалась 1/4 модели для уменьшения объемов вычислений (рис. 1).

Для оценки воздействия добавки ИПТ на температурный режим и термонапряженное состояние массивного бетонного фундамента рассматривалось 2 варианта бетонной смеси: без использования ИПТ (вариант 1) и с добавкой 1 % ИПТ от веса вяжущего (цемент + зола) (вариант 2) в соответствии с рекомендациями производителя. Состав бетонной смеси, свойства материалов, тип добавки ИПТ и результаты измерения температуры в адиабатическом эксперименте двух бетонных смесей взяты по исследовани-

ям [18] и представлены в табл. 1–3. Предполагаемые температурные режимы строительства и свойства материалов представлены в табл. 2.

Основы метода конечных элементов в решении температурных задач

Решение температурной задачи основано на решении основного дифференциального уравнения теплопроводности, которое имеет вид [19, 20]:

∂/∂x(kx ∂T/∂x) + ∂/∂y(ky ∂T/∂y) + ∂/∂z(kz ∂T/∂z) + qv = ρCp ∂T/∂t, (1)

где T = f(x, y, z, t) — искомая температурная функция; kx, ky, kz — коэффициенты теплопроводности материала в трех направлениях x, y, z соответственно, Вт/м·°C; qv — тепловыделение в единице объема или скорость тепловыделения, Вт/м³; ρ — плотность бетона, кг/м³; Cp — удельная теплоемкость, Дж/кг·°C; t — время, ч.

Для решения уравнения (1) используются два основных граничных условия (1-го и 2-го рода), заданных уравнениями (2) и (3):

Tm = Ta на поверхности S1; (2)

kx ∂T/∂x l + ky ∂T/∂y m + kz ∂T/∂z n + q + h(T - Ta) = 0 (3)

на поверхности S2,

где Tm — температура на поверхности бетона или грунта, °C; Ta — температура окружающей среды; l, m, n — направляющие косинусы поверхностей теплопереда-

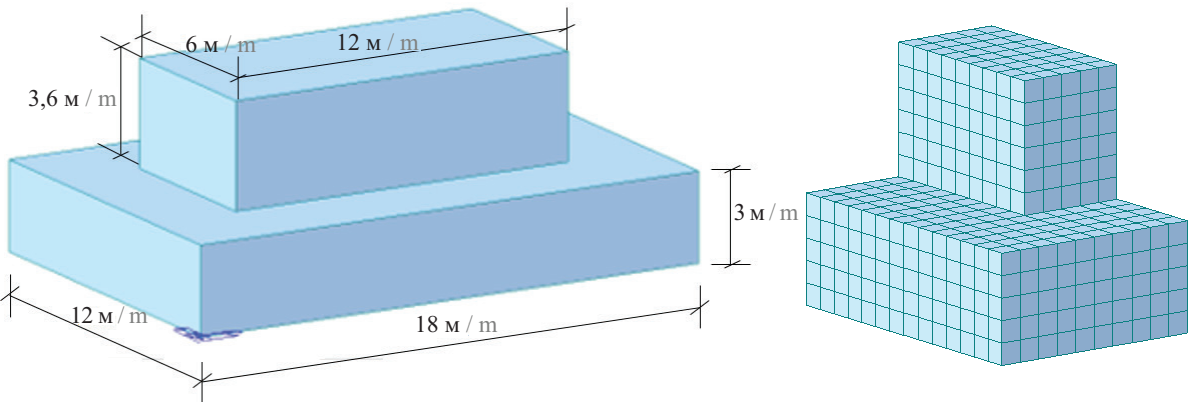


Рис. 1. Расчетная схема и разбиение сетки конечных элементов на 1/4 модели конструкции

Fig. 1. Calculation scheme and division of the finite element mesh into 1/4 of the design model

Табл. 1. Состав вариантов бетонной смеси

Table 1. Composition of concrete mix options

Бетонная смесь Concrete mix	Цемент, кг/м³ Cement, kg/m³	Зола уноса, кг/м³ Fly ash, kg/m³	Песок, кг/м³ Sand, kg/m³	Щебень, кг/м³ Crushed stone, kg/m³	Вода, кг/м³ Water, kg/m³	ИПТ, кг/м³ TRI, kg/m³
Бетонная смесь 1 Concrete mix 1	246	82	609	1333	118	0
Бетонная смесь 2 Concrete mix 2	246	82	609	1333	118	3,28

Табл. 2. Механические и физические свойства материалов

Table 2. Mechanical and physical properties of materials

Параметры материала, ед. / Material parameters, units	Значение / Meaning		
	Бетонная смесь 1 Concrete mix 1	Бетонная смесь 2 Concrete mix 2	Основание Foundation
Коэффициент теплопроводности, кДж/(м·ч·°C) Thermal conductivity coefficient, kJ/(m·h·°C)	7,74	7,74	7,2
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C) Specific heat capacity, kJ/(kg·°C)	0,97	0,97	0,84
Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	2390	2390	1800
Коэффициент конвективной теплопередачи, кДж/(м²·ч·°C) Convective heat transfer coefficient, kJ/(m²·h·°C)	16,6	16,6	40
Модуль упругости, Н/м² / Modulus of elasticity, N/m²	3,2 · 10 ¹⁰	3,25 · 10 ¹⁰	1,8 · 10 ¹⁰
Прочность на сжатие $f'c$, МПа Compressive strength $f'c$, MPa	33,3	35,4	
Коэффициент температурного расширения α Coefficient of thermal expansion α	10 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio	0,167	0,167	0,20
Начальная температура, °C / Initial temperature, °C	25	25	25

Табл. 3. Результаты измерения температуры двух образцов бетонной смеси в адиабатическом эксперименте (приращение температуры вследствие гидратации цемента)

Table 3. Results of temperature measurements of two concrete mix specimens in an adiabatic experiment (temperature increase due to cement hydration)

Время (день) / Time (day)	1	2	3	4	5	6	7	14	21	28
Бетонная смесь 1, °C Concrete mix 1, °C	17,5	23,5	26,4	28,5	30,3	30,9	31,6	33,4	34,2	35,0
Бетонная смесь 2, °C Concrete mix 2, °C	6,1	9,6	13,2	16,5	18,9	20,3	21,8	32,4	33,0	34,5

чи; q — тепловой поток на границе; h — коэффициент конвективного тепловыделения, ккал/м²·ч·°C.

Граничное условие 1-го типа (2) используется по нижней горизонтальной поверхности расчетной области, где задается температура основания. Граничное условие 2-го типа (3) применяется по поверхностям контакта основания или блока с воздухом.

Метод конечных элементов при решении задачи нестационарного теплообмена и внутренних источников выражается сокращенным матричным уравнением следующего вида:

$$[C]\left\{\frac{\partial T}{\partial \tau}\right\} + [K]\{T\} = \{f\}.$$

(4)

При нестационарной задаче теплопередачи необходимо разложить время по временным шагам $\Delta\tau$, на каждом из которых производная температуры по времени определяется так:

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial \tau}\right\} = \frac{1}{\Delta\tau}\{[T(\tau_n) - T(\tau_{n-1})]\}.$$

(5)

Уравнение (4) можно переписать следующим образом:

$$\frac{[C]}{\Delta\tau}\{[T(\tau_n) - T(\tau_{n-1})]\} + [K]\{T\} = \{f\},$$

(6)

где $[C]$ — матрица удельной теплоемкости; $\Delta\tau = \Delta\tau_n - \Delta\tau_{n-1}$ — шаг расчета по времени; $[K]$ — матрица коэффициентов теплопроводности; $\{f\}$ — генерируемая тепловая матрица.

Решение уравнения (6) дает нам температурное поле в бетонном блоке в разные моменты времени.

Оценка риска термического растрескивания на ранних стадиях в массивных бетонных конструкциях по индексу трещин и вероятности появления трещин

Оценка и прогнозирование образования трещин в массивных бетонных конструкциях играет очень важную роль при проектировании и строительстве. Это помогает инженерам активно использовать необходимые меры для минимизации риска образования трещин и контроля развития трещин в конструкциях. Существует множество критериев оценки и прогнозирования образования термических трещин на раннем этапе, введенных во многих странах. Каждый критерий имеет свои преимущества и недостатки, подходящие для конкретных условий и конструкций. Однако общее правило, обеспечивающее отсутствие термических трещин в конструкции, заключается в том, что возникающее в бетонной конструкции

температурное напряжение не должно превышать предел прочности бетона:

$$\sigma_n(t) \leq f_k(t), \tag{7}$$

где $\sigma_n(t)$ — температурное напряжение в момент времени t , МПа; $f_k(t)$ — предел прочности бетона в момент времени t , МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты температурного анализа массивного бетонного фундамента для двух вариантов бетонной смеси с использованием Midas Civil 2019 представлены на рис. 2, 3. Сравнение полученных результатов позволяет отметить следующее. На начальном этапе твердения бетона (первые 6 суток после укладки) кривая повышения температуры для варианта 1 значительно круче, чем для варианта 2 (рис. 3).

Это свидетельство того, что скорость выделения тепла у варианта 1 гораздо выше, чем у варианта 2. Максимальная температура в фундаменте из бетона без добавки ИПТ (вариант 1) достигается через 140 ч после укладки и равна 57,87 °С. Для варианта бетона с добавкой ИПТ (вариант 2) максимальная температура, равная 53,23 °С, возникает через 360 ч (рис. 2, 3). Таким образом, максимальная разница температур в центре массива и на его поверхности (при температуре воздуха, принятой 25 °С) равна 31,8 °С для варианта 1 и 26,3 °С для варианта 2, что превосходит рекомендуемые ограничения1. После достижения пиковой температуры оба бетонных массива начинают остывать. Остывание конструкции для обоих вариантов происходит с примерно одинаковой скоростью, так как две части кривых после 360 ч после укладки бетона почти параллельны (рис. 3).

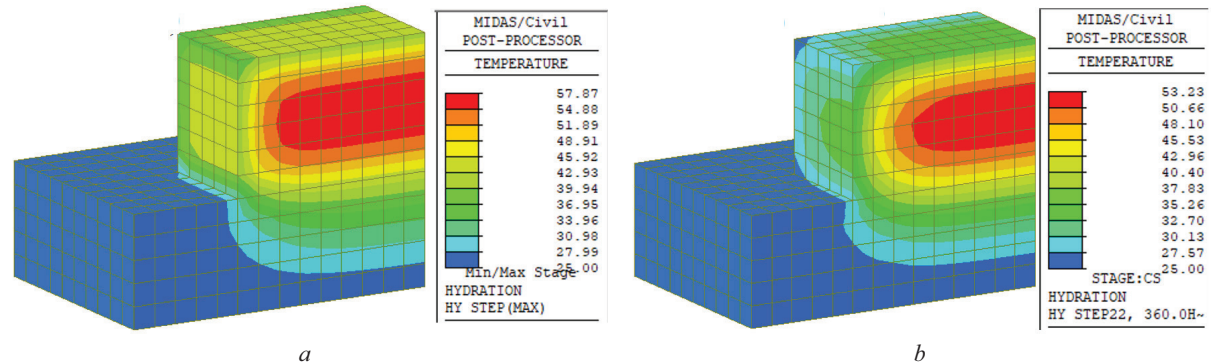


Рис. 2. Поле температуры на моменты времени возникновения максимальной температуры в центре бетонного массива: а — для варианта бетона 1 (без добавки ИПТ); б — для варианта бетона 2 (с добавкой 1 % ИПТ)

Fig. 2. Temperature field at the moments of time of occurrence of the maximum temperature in the cente of the concrete mass: а — for concrete variant 1 (without the addition of TRI); б — for concrete variant 2 (with the addition of 1 % TRI)

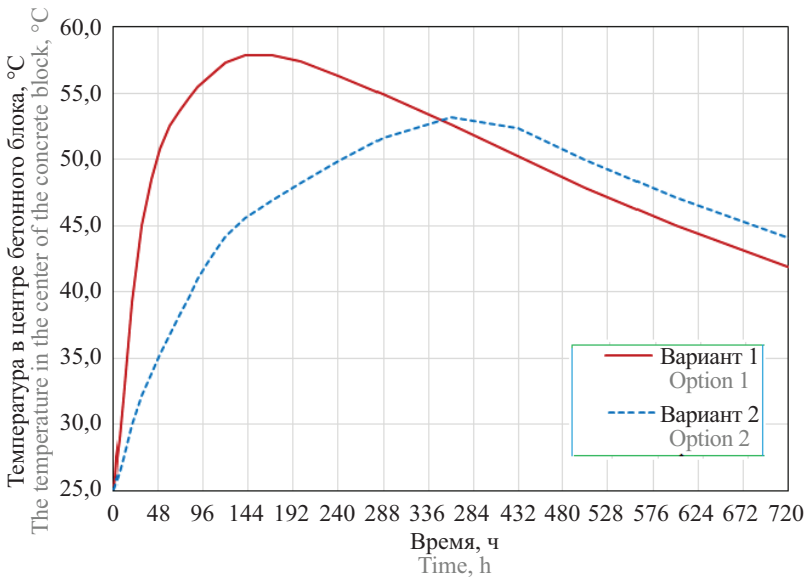


Рис. 3. Изменение температуры в центре массивного бетонного фундамента с течением времени для двух вариантов бетонной смеси

Fig. 3. Temperature change at the cente of a massive concrete foundation over time for two concrete mix options

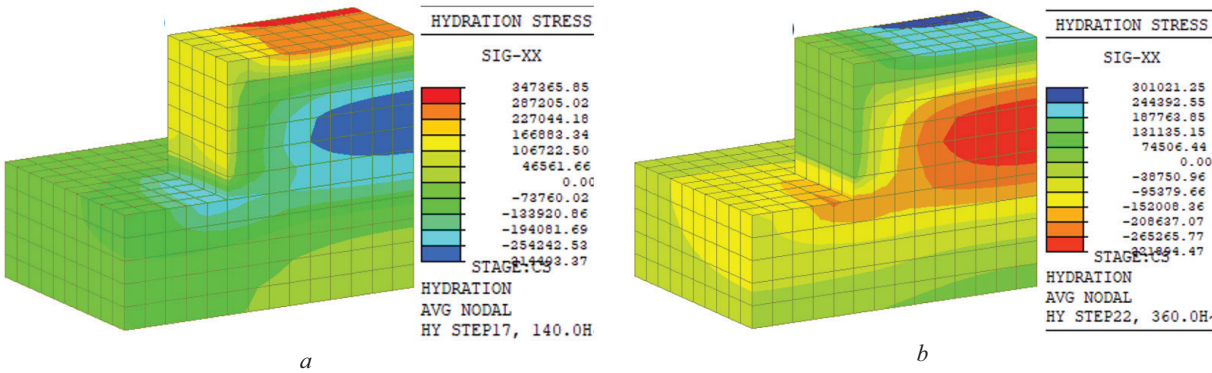


Рис. 4. Распределение термических напряжений в массивном бетонном фундаменте на моменты времени возникновения максимальных растягивающих напряжений: *a* — для варианта бетона 1 (без добавки ИПТ); *b* — для варианта бетона 2 (с добавкой 1 % ИПТ)

Fig. 4. Distribution of thermal stresses in a massive concrete foundation at the moments of time of occurrence of maximum tensile stresses: *a* — for concrete variant 1 (without TRI additive); *b* — for concrete variant 2 (with 1 % TRI additive)

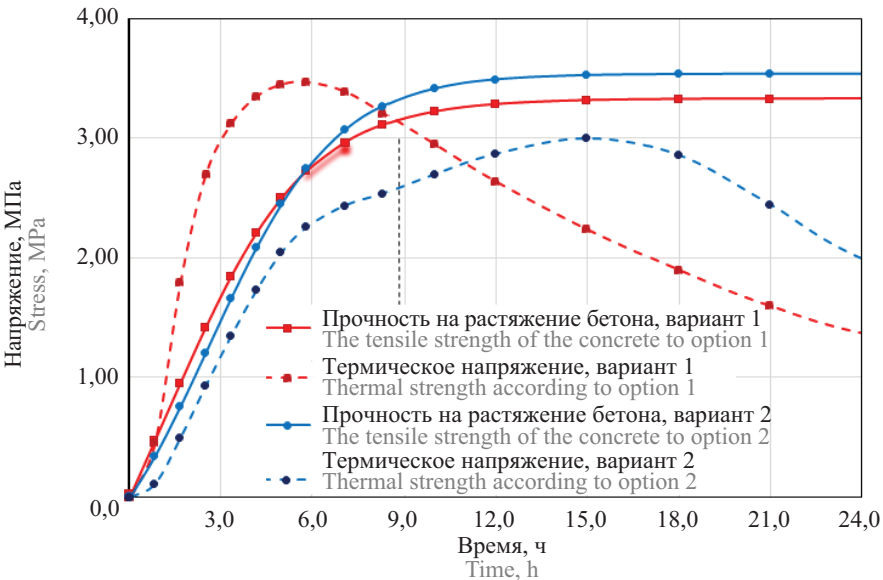


Рис. 5. Графики изменения термических напряжений и прочности бетона на растяжение по времени

Fig. 5. Graphs of changes in thermal stresses and tensile strength of concrete over time

На каждом шаге по времени также решалась задача по определению термонапряженного состояния бетонного массива и прилегающего основания. Некоторые результаты решения представлены на рис. 4, 5.

На рис. 4 приведены поля температурных напряжений на моменты времени, когда возникают максимальные растягивающие напряжения: 140 ч после укладки бетона для варианта 1 (рис. 4, *a*) и 360 ч — для варианта 2. Максимальные растягивающие напряжения возникают на поверхности массива и равны соответственно 3,47 МПа (вариант 1) и 3,00 МПа (вариант 2).

По результатам расчета по ПК Midas Civil 19 для двух вариантов бетонной смеси также были построены графики изменения во времени термических напряжений и пределов прочности бетона (рис. 5).

Как видно, максимальное растягивающее термическое напряжение, возникающее в варианте 1, составляет 3,47 МПа через 5 дней, а в варианте 2 — 3,0 МПа через 15 дней. Это полностью соответствует времени достижения бетоном максимальной температуры для рассмотренных вариантов.

Можно отметить, что для варианта бетона с добавкой ИПТ возникающее в конструкции максимальное термическое напряжение всегда меньше, чем предел прочности бетона на этот момент времени (рис. 5). Это свидетельствует о минимальном риске термического растрескивания. Что касается конструкций с использованием бетонной смеси без добавки ИПТ (вариант 1), то в период времени от 1 до почти 9 дней после укладки бетона возникающие растягивающие термические

напряжения превышают предел прочности бетона, т.е. не выполняется условие (7). Поэтому риск появления термических трещин в этот период очень велик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Рассмотренный вид ингибитора понижения теплоты гидратации достаточно эффективен для уменьшения тепловыделения от гидратации цемента в массивных бетонных конструкциях. Его использование снижает скорость тепловыделения на ранней стадии твердения бетона (первые 6 суток после укладки), что задерживает время достижения пиковой температуры. При этом также снижается максимальная температура в конструкции.

После достижения максимальной температуры скорость снижения теплоты в бетоне без применения добавок ИПТ и с применением добавок ИПТ одина-

кова, это доказывает, что добавки ИПТ не вызывают термического удара конструкции.

При использовании 1 % содержания рассмотренной добавки ИПТ (от расхода вяжущего цемент + зола) при строительстве массивных бетонных фундаментов с размерами, на превышающими размеры рассмотренного варианта, фундамент не подвергается риску появления термических трещин. Возникающие в конструкции максимальные термические напряжения в этом случае всегда меньше, чем предел прочности бетона на всем временном интервале.

Результаты представленного исследования являются первым шагом в решении исследуемой проблемы и требуют дальнейшего развития. В последующем планируется результаты исследования сравнить с результатами натурных экспериментов, чтобы полностью оценить влияние добавки ИПТ на процесс тепловыделения при гидратации цемента и возможного температурного трещинообразования в массивных бетонных конструкциях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams // *Journal of Thermal Stresses*. 2013. Vol. 36. Issue 2. Pp. 112–134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
2. Atrushi D.S. Tensile and compressive creep of young concrete: Testing and modelling : Doctoral Thesis. 2003. 333 p.
3. Bofang Z. Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Butterworth-Heinemann, 2014. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3
4. Gajda J., Vangeem M. Controlling temperatures in mass concrete // *ACI Concrete International*. 2002. Vol. 24. Issue 1. Pp. 59–62.
5. Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П., Солдатов П.В. и др. Гидротехнические сооружения. Часть 2. М. : АСВ, 2011. 535 с. EDN QNPLYZ.
6. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 237. P. 032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117
7. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure // *Structural Integrity and Life*. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 8–12. EDN KPTOUC.
8. Kong F.R., Pan L.S., Wang C.M., Zhang D.L., Xu N. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. Pp. 545–553. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178
9. Zhang H., Wang W., Li Q., Tian Q., Li L., Liu J. A starch-based admixture for reduction of hydration heat in cement composites // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 173. Pp. 317–322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.199
10. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 283. P. 01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032
11. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism // *Materials*. 2023. Vol. 16. Issue 8. P. 2992. DOI: 10.3390/ma16082992
12. Malaiškieienė J., Vaičienė M. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Durability of Concrete // *Materials*. 2024. Vol. 17. Issue 16. P. 4031. DOI: 10.3390/ma17164031
13. Yan Y., Ouzia A., Yu C., Liu J.P., Scrivener K.L. Effect of a novel starch-based temperature rise inhibitor on cement hydration and microstructure development // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 129. P. 105961. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105961
14. Zhang H., Liu X., Feng P., Li L., Wang W. Influence of temperature rising inhibitor on nucleation and growth process during cement hydration // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 681. P. 178403. DOI: 10.1016/j.tca.2019.178403
15. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 283. P. 01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032
16. Zhang H., Li L., Feng P., Wang W., Tian Q., Liu J. Impact of temperature rising inhibitor on hydration

kinetics of cement paste and its mechanism // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 93. Pp. 289–300. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.018

17. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19. P. e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680

18. Xu W., Qiang S., Hu Z., Ding B., Yang B. Effect of hydration heat inhibitor on thermal stress of hydraulic structures with different thicknesses // *Advances*

in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Issue 1. DOI: 10.1155/2020/5029865

19. Aniskin N.A., Shaytanov A.M. Optimization of the Temperature and Thermo-Stressed State of a Concrete Dam Constructed from Particularly Lean Roller-Compacted Concrete // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 914. DOI: 10.3390/buildings13040914

20. Jia C., Shao A., Li Y., Ren Q. Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction // *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2010. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5449456

Поступила в редакцию 20 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 30 января 2025 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Нгуен Чонг Чык — кандидат технических наук, главный преподаватель; **Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона**; г. Ханой, Вьетнам; Scopus: 57214830825, ORCID: 0000-0001-9723-5161; trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn;

Хоанг Куок Лонг — кандидат технических наук, доцент; **Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона**; г. Ханой, Вьетнам; ORCID: 000-0002-9656-0664; hoanglongcse@gmail.com;

Ле Ван Хунг — аспирант; **Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона**; г. Ханой, Вьетнам; ResearcherID: MDT-6226-2025, ORCID: 0009-0003-7382-9573; levanhungsqcb@gmail.com;

Николай Алексеевич Анискин — доктор технических наук, профессор, директор Института гидротехнического и энергетического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; nikolai_aniskin@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams. *Journal of Thermal Stresses*. 2013; 36(2):112-134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795

2. Atrushi D.S. *Tensile and compressive creep of young concrete: Testing and modelling: Doctoral Thesis*. 2003; 333.

3. Bofang Z. *Thermal stresses and temperature control of mass concrete*. Butterworth-Heinemann, 2014. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3

4. Gajda J., Vangeem M. Controlling temperatures in mass concrete. *ACI Concrete International*. 2002; 24(1):59-62.

5. Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Bestuzheva A.S., Sainov M.P., Soldatov P.V. et al. *Water-development works. Part 2*. Moscow, ASV, 2011; 535. EDN QNPLYZ. (rus.).

6. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 237:032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117

7. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure. *Structural Integrity and Life*. 2019; 19(1):8-12. EDN KPTOUC.

8. Kong F.R., Pan L.S., Wang C.M., Zhang D.L., Xu N. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. *Construction and Building Materials*. 2016; 105:545-553. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178

9. Zhang H., Wang W., Li Q., Tian Q., Li L., Liu J. A starch-based admixture for reduction of hydration heat in cement composites. *Construction and Building Materials*. 2018; 173:317-322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.199

10. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall. *E3S Web of Conferences*. 2021; 283:01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032

11. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism. *Materials*. 2023; 16(8):2992. DOI: 10.3390/ma16082992

12. Malaiškienė J., Vaičienė M. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Durability of Concrete. *Materials*. 2024; 17(16):4031. DOI: 10.3390/ma17164031

13. Yan Y., Ouzia A., Yu C., Liu J.P., Scrivener K.L. Effect of a novel starch-based temperature rise inhibitor on cement hydration and microstructure development. *Cement and Concrete Research*. 2020; 129:105961. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105961

14. Zhang H., Liu X., Feng P., Li L., Wang W. Influence of temperature rising inhibitor on nucleation and growth process during cement hydration. *Thermochimica Acta*. 2019; 681:178403. DOI: 10.1016/j.tca.2019.178403

15. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall. *E3S Web of Conferences*. 2021; 283:01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032

16. Zhang H., Li L., Feng P., Wang W., Tian Q., Liu J. Impact of temperature rising inhibitor on hydration kinetics of cement paste and its mechanism. *Cement and*

Concrete Composites. 2018; 93:289-300. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.018

17. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19:e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680

18. Xu W., Qiang S., Hu Z., Ding B., Yang B. Effect of hydration heat inhibitor on thermal stress of hydraulic structures with different thicknesses. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020(1). DOI: 10.1155/2020/5029865

19. Aniskin N.A., Shaytanov A.M. Optimization of the Temperature and Thermo-Stressed State of a Concrete Dam Constructed from Particularly Lean Roller-Compacted Concrete. *Buildings*. 2023; 13(4):914. DOI: 10.3390/buildings13040914

20. Jia C., Shao A., Li Y., Ren Q. Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2010; 1-5. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5449456

Received January 20, 2025.

Adopted in revised form on January 30, 2025.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S: **Nguyen Trong Chuc** — Candidate of Technical Sciences, Chief Lecturer; **Le Quy Don Technical University**; Hanoi, Vietnam; Scopus: 57214830825, ORCID: 0000-0001-9723-5161; trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn;

Hoang Quoc Long — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Le Quy Don Technical University**; Hanoi, Vietnam; ORCID: 000-0002-9656-0664; hoanglongese@gmail.com;

Le Van Hung — postgraduate student; **Le Quy Don Technical University**; Hanoi, Vietnam; ResearcherID: MDT-6226-2025, ORCID: 0009-0003-7382-9573; levanhungsqcb@gmail.com;

Nikolay A. Aniskin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Hydrotechnical and Power Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; nikolai_aniskin@mail.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.042.41

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.381-393

Применение методов машинного обучения для прогнозирования аэродинамических коэффициентов давления на здания и сооружения прямоугольных форм

Сергей Гургенович Саиян, Вероника Борисовна Шелепина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Ветровые воздействия являются одним из ключевых факторов при расчете зданий и сооружений. Нормативные расчеты, физическое и численное моделирование, а также натурные измерения имеют ряд ограничений в применении. Использование технологий машинного обучения (ML) открывает новые возможности для оперативного и точного прогнозирования ветровых нагрузок. Рассматривается применение ML-моделей для оценки распределения аэродинамических коэффициентов давления на здания прямоугольных форм, что позволяет не только вычислять интегральные характеристики (силы, моменты), но и детально анализировать распределение нагрузок по фасадам.

Материалы и методы. Для обучения моделей использовалась база данных Токийского политехнического университета, в которой представлены результаты испытаний в аэродинамической трубе на моделях зданий различной высоты и ширины. Произведена аугментация данных, что увеличило исходный объем выборки и повысило способность ML-моделей обобщать различные геометрические конфигурации. В ходе обработки признаков учитывались разные углы атаки ветра, а также анализировалась корреляция признаков с целью устранения мультиколлинеарности. Основными методами прогнозирования выступили линейная регрессия, дерево решений и градиентный бустинг (CatBoost).

Результаты. Проведенные расчеты показали, что наилучший баланс между точностью предсказаний и сохранением физической интерпретируемости обеспечил градиентный бустинг над решающим деревом (CatBoost), снизив среднюю взвешенную ошибку до 16–18 %. Дополнительно выполнено сопоставление с результатами аэродинамических испытаний, что подтвердило адекватность предложенного подхода.

Выводы. Применение методов машинного обучения, в частности градиентного бустинга, дает возможность надежно прогнозировать аэродинамические коэффициенты давления на различные габаритные формы зданий при широком диапазоне углов ветровой атаки. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования ML-моделей для ускорения и удешевления этапов оценки ветровых воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ветровая нагрузка, машинное обучение (ML), аугментация данных, дерево решений, градиентный бустинг, аэродинамический коэффициент, здания и сооружения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саиян С.Г., Шелепина В.Б. Применение методов машинного обучения для прогнозирования аэродинамических коэффициентов давления на здания и сооружения прямоугольных форм // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 381–393. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.381-393

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

Application of machine learning methods to predict aerodynamic pressure coefficients on rectangular buildings and structures

Sergey G. Saiyan, Veronica B. Shelepina

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

ABSTRACT

Introduction. Wind effects are one of the key factors in the design of buildings and structures. Normative calculations, physical and numerical modelling, as well as in-situ measurements have a number of limitations in application. The use of machine learning (ML) technologies opens up new opportunities for rapid and accurate prediction of wind loads. The application of ML models to assess the distribution of aerodynamic pressure coefficients on rectangular buildings is considered, which allows not only to calculate integral characteristics (forces, moments), but also to analyze in detail the distribution of loads on facades.

Materials and methods. For model training, the Tokyo Polytechnic University database was used, which presents the results of wind tunnel tests on building models of various heights and widths. Data augmentation was performed, which increased the original example size and increased the ability of ML models to generalize various geometric configurations.

During feature processing, different angles of wind attack were taken into account, and the correlation of features was analyzed in order to eliminate multicollinearity. Linear regression, decision tree and gradient boosting (CatBoost) were the main prediction methods.

Results. The calculations showed that the best balance between the accuracy of predictions and maintaining physical interpretability was provided by gradient boosting over the decision tree (CatBoost), reducing the average weighted error to 16–18 %. In addition, a comparison was made with the results of aerodynamic tests, which confirmed the adequacy of the proposed approach.

Conclusions. The application of machine learning methods, in particular gradient boosting, makes it possible to reliably predict aerodynamic pressure coefficients on various dimensional shapes of buildings at a wide range of wind attack angles. The obtained results demonstrate the promising use of ML models to accelerate and reduce the cost of wind impact assessment stages.

KEYWORDS: wind load, machine learning (ML), data augmentation, decision tree, gradient boosting, aerodynamic coefficient, buildings and structures

FOR CITATION: Saiyan S.G., Shelepina V.B. Application of machine learning methods to predict aerodynamic pressure coefficients on rectangular buildings and structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):381-393. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.381-393 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Ветровые воздействия — один из ключевых факторов при расчете несущей способности зданий, особенно высотных. Рост этажности и усложнение архитектурных и конструктивных решений требуют совершенствования методов оценки ветровых нагрузок. Сегодня используют четыре основных подхода: нормативные методы, физическое моделирование (экспериментальные исследования) в аэродинамических трубах (АДТ), численное моделирование (CFD), а также мониторинг (натурные замеры). Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки.

Нормативные методики [1] хорошо оценивают средние ветровые нагрузки, но не учитывают эффекты вихреобразования и пульсаций, особенно в сложной застройке. Экспериментальные исследования (в градиентных аэродинамических трубах) [2–5] дают детализированную картину распределения давлений, но обходятся дорого и необходима длительная подготовка. CFD-моделирование [6–9] позволяет гибко анализировать обтекание, однако остается вычислительно затратным и нуждается в валидации. Натурные наблюдения [10–13] дают самые достоверные данные о средних и пульсационных нагрузках, но доступны лишь на реальном объекте и требуют значительных затрат.

Активно развиваются методы машинного обучения (ML), изначально применявшиеся в анализе больших данных (Big Data), а сейчас все шире используемые в различных областях науки и техники, в том числе в аэродинамике сооружений. ML-модели способны быстро выдавать прогнозы ветровых нагрузок по заданным входным параметрам, выявлять сложные нелинейные связи и оптимизировать форму здания. Зарубежные исследования [14–19] показывают эффективность ML для расчета аэродинамических коэффициентов, однако в российской литературе таких работ мало. В отдельных отечественных исследованиях [20] авторами были выявлены значительные недостатки: небольшой объем данных, руч-

ная настройка весов, отсутствие учета неопределенности и некорректно выбранные целевые функции.

В работе авторов [21] описан подход с использованием ML и CFD для оценки аэродинамических характеристик закручивающихся высотных зданий, где обучение на 217 численных решениях дало точность до 5 %. В большинстве публикаций фокус направлен на интегральные аэродинамические коэффициенты (силы, моменты), что не предоставляет картины распределения нагрузок по фасадам.

Научная новизна настоящего исследования заключается в анализе распределения аэродинамических коэффициентов давления на гранях зданий с применением ML, а также в методологии выбора оптимального подхода (модели) для прогнозирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обучения моделей использовалась база данных Токийского политехнического университета¹, представляющая собой результаты испытаний в АДТ для моделей домов прямоугольных форм. Размеры домов варьируются с шагом 0,1 по высоте — от 0,1 до 0,5, по ширине — 0,1 до 0,3, по глубине размер фиксирован — 0,1. В используемой базе данных приведены расчеты для угла ветровой атаки в диапазоне (0, 90) градусов с шагом 5 градусов. Результаты испытаний приведены в виде аэродинамического давления в датчиках (рис. 1), расположенных на гранях домов, для 32 с времени с шагом 0,001. В настоящем исследовании рассматривается определение средних значений аэродинамического коэффициента ветрового давления.

Подготовка данных. Для формирования входных данных значения нестационарных расчетов были сгруппированы по датчикам методом среднего.

¹ Wind Engineering Information Center. TPU Aerodynamic Database URL: <https://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>

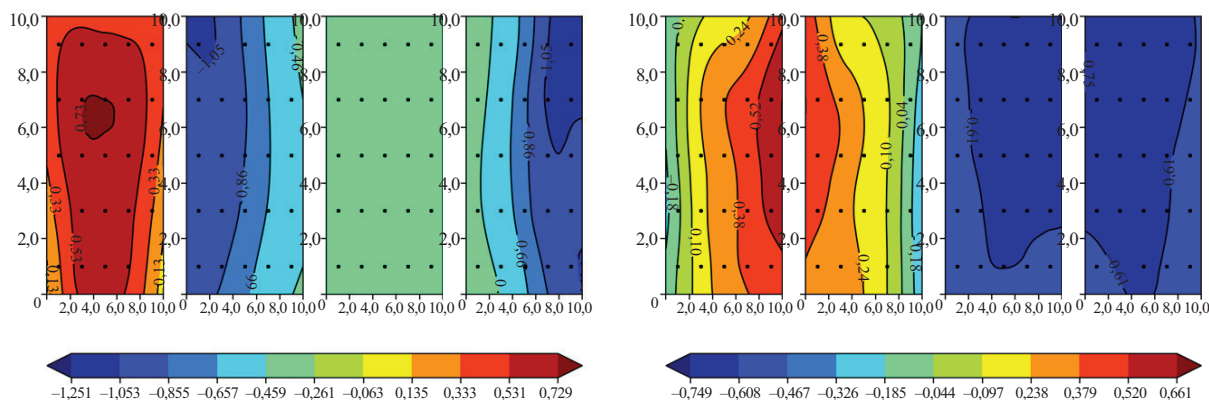


Рис. 1. Изополя средних аэродинамических коэффициентов для угла ветровой атаки 0 и 45 градусов

Fig. 1. Isopoles of average aerodynamic coefficients for 0 and 45 degrees wind angle of attack

Координаты датчиков переведены в относительное расстояние от центра грани по формулам:

$$\hat{x} = \frac{x - \left(\frac{side}{2}\right)}{\left(\frac{side}{2}\right)}; \quad \hat{y} = \frac{y - \left(\frac{h}{2}\right)}{\left(\frac{h}{2}\right)}, \quad (1)$$

где x, y — исходные координаты; $side$ — ширина или глубина в зависимости от грани; h — высота.

Полученный датасет содержит 85 500 строк. Учитывая специфику задачи, количество данных является недостаточным для ее решения с допустимой точностью.

Аугментацией данных называется процесс искусственного генерирования данных на основе существующих. Один из методов создания новых сведений — интерполяция.

В исследовании использовался следующий подход:

- каждому дому $id1$ ставится в соответствие каждый другой дом $id2$;
- модель интерполяции $id2$ генерирует значения аэродинамического коэффициента для координат датчиков из $id1$.

Таким образом, в результате аугментации данных конечный датасет содержит 676 400 строк, т.е. количество данных возросло более чем в 7 раз.

Преобразование признаков. Информация об угле ветровой атаки представлена в градусной форме, в то время как для учета периодичности следует использовать тригонометрическую:

$$\sin = \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right); \quad \cos = \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right), \quad (2)$$

где α — угол атаки ветра.

Давление на различных гранях одного дома сильно отличается между собой, однако разделять их на разные модели машинного обучения не следует — они тесно связаны с углом ветровой атаки и являются компонентами одного дома. Для создания такой связи выразим все грани через первую, рассматривая их как расчеты для разных углов ветровой атаки,

в том числе и выходящие за диапазон расчетов. С целью учета периодичности воспользуемся приведенной выше формулой и переведем угол в тригонометрический вид.

Отбор признаков. Корреляция между признаками и целевой переменной играет важную роль в задачах регрессии. Кроме того, что подобная оценка позволяет убрать из модели признаки с нулевой корреляцией, она дает возможность выявить взаимосвязи между признаками. Использование признаков с сильной корреляцией (мультиколлинеарностью) может привести к следующим проблемам: нестабильность оценки модели, переобучение, потеря информации за счет обработки избыточных признаков.

В случаях мультиколлинеарности признаков применяют различные методы, в исследовании авторов применялось удаление одного из признаков. По приведенной матрице на рис. 2, *a* можно заметить сильную корреляцию между координатой датчика и ее относительным расстоянием, оставив один из этих признаков, мы не только сохраним, но и улучшим точность, снизив при этом время обработки и обучения моделей. На рис. 2, *b* представлена матрица корреляции для признаков, которые участвуют в итоговом обучении модели, и целевой переменной (коэффициент).

Линейная регрессия. Основной задачей линейной регрессии является нахождение линейных связей между признаками и целевой переменной. Для случая множественной регрессии, когда функция зависит от нескольких переменных, формула имеет вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon, \quad (3)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ — независимые переменные (признаки); $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ — коэффициенты, соответствующие каждому из признаков; ϵ — отклонение фактического значения от предсказанного.

Дерево решений. Дерево решений в задачах регрессии разбивает данные, основываясь на выборе признаков и значений, которые минимизируют ошибку. Математически этот процесс можно описать как разбиение данных на две части так, чтобы

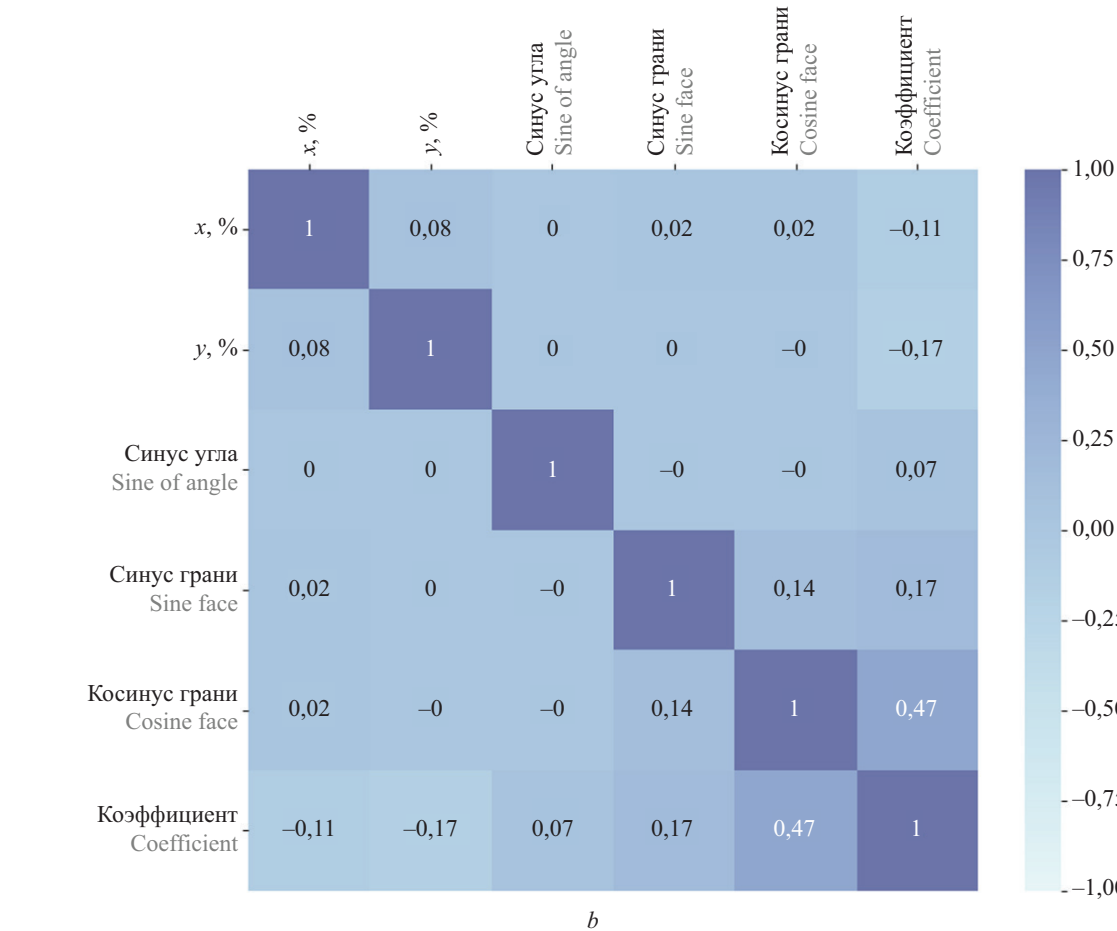
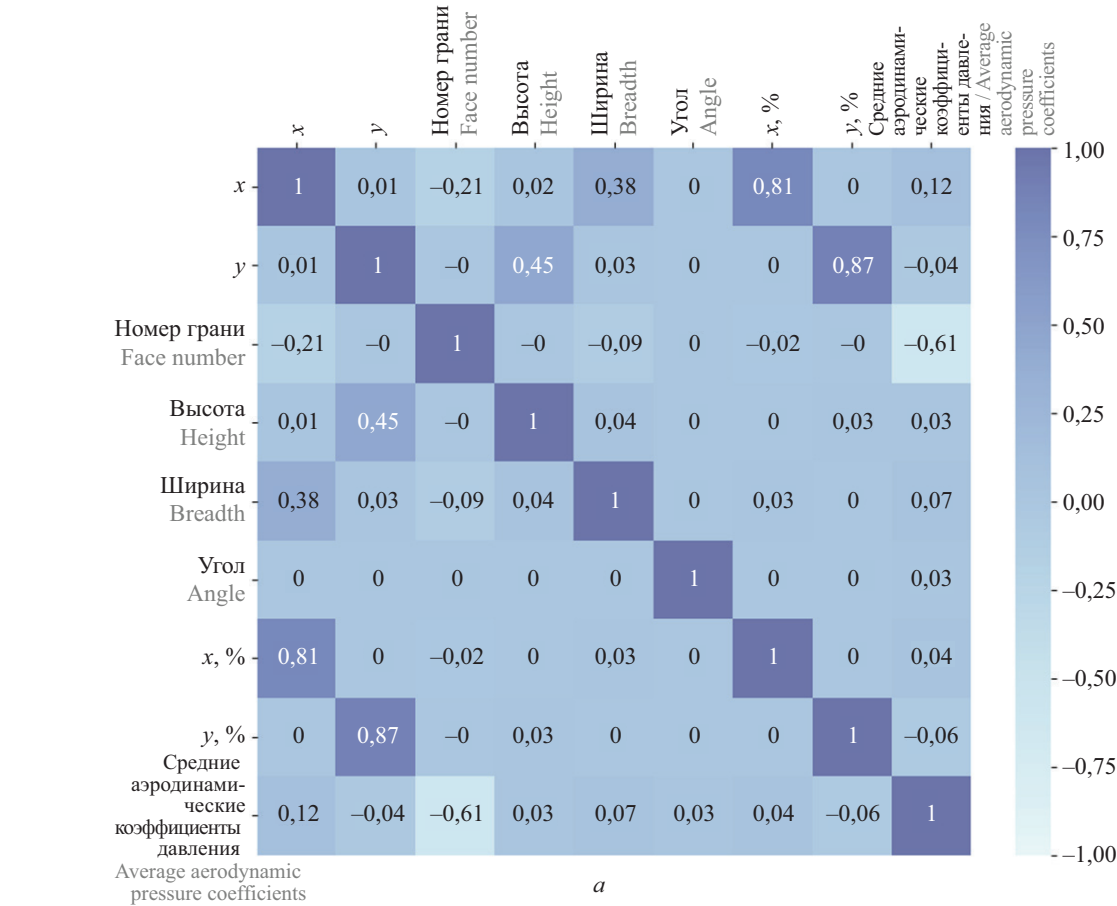


Рис. 2. Матрица корреляции для исходных данных (a) и матрица корреляции для признаков, отобранных для обучения (b)
Fig. 2. The correlation matrix for the initial data (a) and the correlation matrix for the features selected for training (b)

снизить выбранную ошибку (обычно MSE). Предсказания значений получаются из листовых узлов, которыми называют концы ветвей дерева решений, и рассчитываются как среднее значение целевой переменной в этом узле.

Градиентный бустинг. Градиентный бустинг — это ансамблевый метод, который последовательно обучает несколько деревьев решений, обучая каждое новое на тех данных, с которыми не справились предыдущие, тем самым улучшая точность и позволяя создать модель с более высокой точностью. Градиентный бустинг пусть и уступает нейросетевым моделям в гибкости, но выигрывает в простоте настройки и служит одним из сильнейших алгоритмов для решения регрессионных задач.

Использованная в работе библиотека *CatBoost* позволяет детально настраивать параметры обучения модели градиентного бустинга над решающим деревом. Некоторые гиперпараметры, такие как: скорость обучения, количество итераций, глубина дерева и минимальное количество листьев определялось с помощью библиотеки *Optuna*. Обучение модели производилось в два этапа: 1000 итераций с шагом обучения 0,1, затем 2500 итераций с шагом обучения 0,05, чтобы достигнуть баланса между производительностью и сложностью модели. Невысокие значения шага обучения делают обучение более стабильным и осторожным, что позволяет избежать резких скачков в весах модели и, как следствие, переобучения.

Прочие гиперпараметры:

1. Метрика оценки — средняя абсолютная ошибка (MAE). Кроме того, что дает возможность моделям лучше справляться с выбросами и подходит для работы с несимметричными распределениями целевых переменных, отображает ошибку того же порядка, как и целевая переменная, что позволяет адекватно оценивать погрешность при работе с данными маленького порядка:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (4)$$

где n — общее количество наблюдений; y_i — истинное значение для i -го наблюдения; $\hat{y}_i$ — предсказанное значение для i -го наблюдения.

2. Глубина дерева — 10. Эта глубина деревьев позволяет улавливать сложные зависимости в данных.

3. Регуляризация $L2$ — 5. Параметр предотвращает переобучение модели, уменьшая вес коэффициентов, что важно при наличии шума в данных.

4. Случайность при выборе данных (*bagging_temperature*) — 0,8. Параметр регулирует разнообразие моделей, которые строятся, добавляя случайность в выборку данных для обучения каждого дерева.

5. Политика выращивания деревьев — *Depthwise*. Этот параметр устанавливает правило разбиения деревьев достижения установленной глубины, что может быть особенно полезно при обучении данных со сложными взаимосвязями.

В результате выбранных параметров на первом этапе обучения (1000 итераций, шаг обучения — 0,1) средняя абсолютная ошибка составила 0,061, следующие 2500 итераций с шагом обучения 0,05 снизили ошибку до 0,056.

Оценки точности. Поскольку целевые значения — это значения маленького порядка, зачастую близкие к нулю, расчет средней абсолютной процентной ошибки в общем виде может приводить к результатам, не отображающим реальную способность модели. В связи с этим оригинальная средняя абсолютная процентная ошибка была дополнена весами для каждого наблюдения. Каждая разность между предсказанием и оригинальным значением умножалась на свое абсолютное значение, что в процентном соотношении позволило снизить влияние процентных ошибок между значениями маленького порядка:

$$WAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \cdot 100, \quad (5)$$

где w_i — вес для разницы каждого наблюдения, в настоящем исследовании является абсолютным значением для y_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате обработки данных был получен датасет размером в 676 400 строк, содержащий аэродинамические коэффициенты с разными углами ветровой атаки для домов различных размеров. Для оценки точности полученных моделей из исходной базы данных выбраны дома размерами $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ и $0,3 \times 0,1 \times 0,4$. Такой выбор обусловлен граничными значениями высоты в первом случае и ширины во втором; данные, определенные как тестовые, не участвуют в обучении модели и используются только для оценки точности.

Линейная регрессия. На рис. 3 представлены результаты прогнозирования аэродинамического давления методом линейной регрессии для зданий $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ при угле ветровой атаки, равном 0. Линейная регрессия в связи с наличием между признаками и целевой переменной нелинейной связи показала результат, непригодный для дальнейшего рассмотрения этого метода.

Дерево решений. На рис. 4 приведены изополы среднего аэродинамического коэффициента, построенные на обученной модели дерева решений, для зданий $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ при угле ветровой атаки 0. В табл. 1 представлена средняя взвешенная процентная ошибка для этого метода.

Средняя точность прогнозирования для всех углов ветровой атаки для дома $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ составила 20,1 %. Для дома $0,3 \times 0,1 \times 0,4$ — 24 %.

Градиентный бустинг решающего дерева. Результаты предсказаний модели градиентного бустинга показаны на рис. 5. В табл. 2 приведена средняя взвешенная процентная ошибка для данного метода.

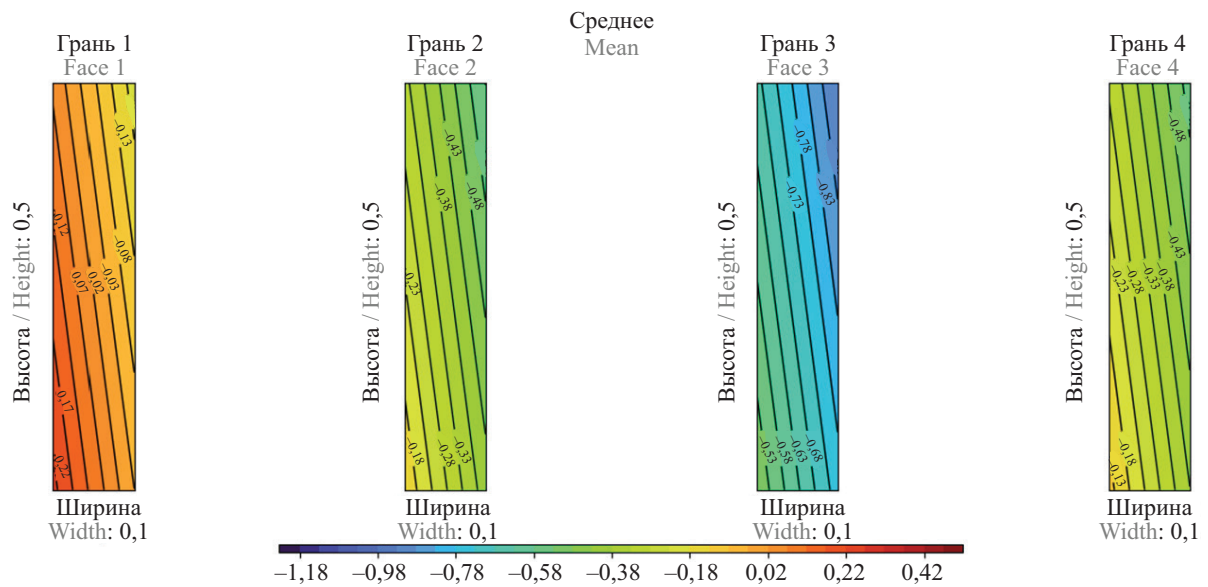


Рис. 3. Результаты прогнозирования аэродинамического коэффициента линейной регрессией на здания $0,1 \times 0,1 \times 0,5$
Fig. 3. The results of aerodynamic coefficient prediction by linear regression for buildings $0.1 \times 0.1 \times 0.5$

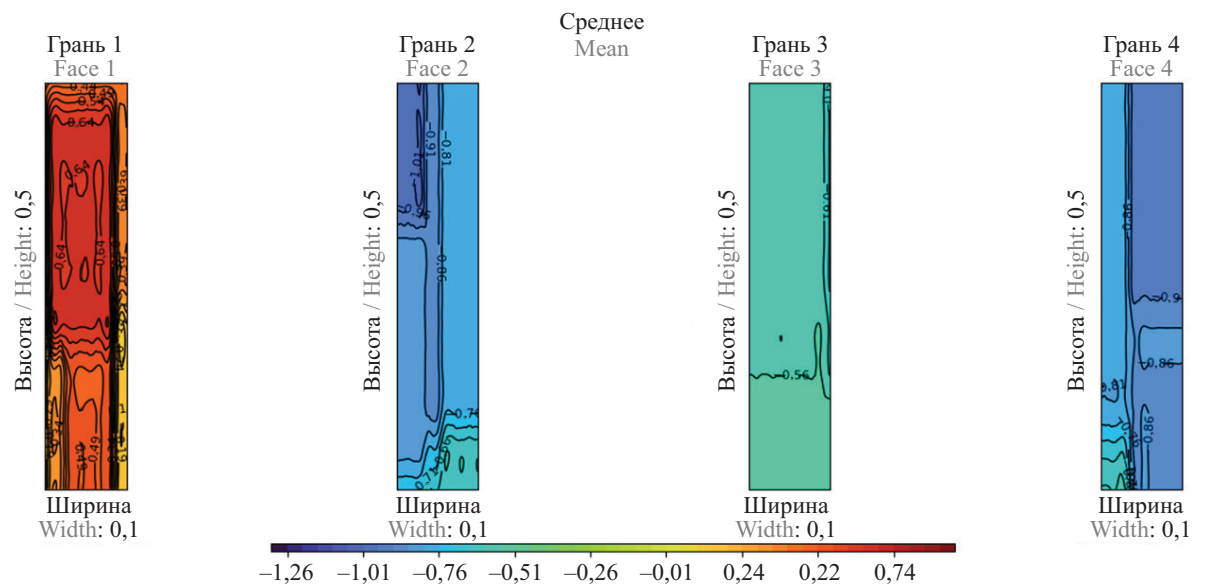


Рис. 4. Результаты прогнозирования аэродинамического коэффициента решающим деревом на здания $0,1 \times 0,1 \times 0,5$
Fig. 4. The results of aerodynamic coefficient prediction by the decision tree for buildings $0.1 \times 0.1 \times 0.5$

Табл. 1. Средняя взвешенная процентная ошибка для решающего дерева

Table 1. Mean weight absolute percentage error for decision tree

Габариты модели Model dimensions	Ошибка на грани 1, % Error on the facet 1, %	Ошибка на грани 2, % Error on the facet 2, %	Ошибка на грани 3, % Error on the facet 3, %	Ошибка на грани 4, % Error on the facet 4, %	Средняя погрешность Average error
$0,1 \times 0,1 \times 0,5$	19,7	6,6	7,3	6,8	10,1
$0,3 \times 0,1 \times 0,4$	20,7	19,8	7,7	14,3	15,6

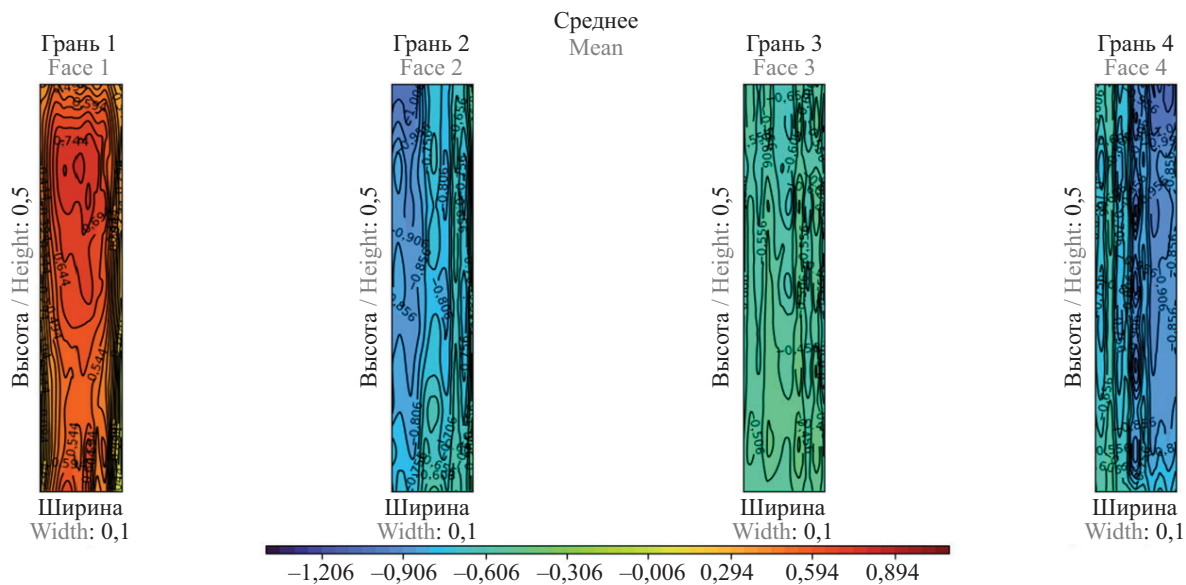
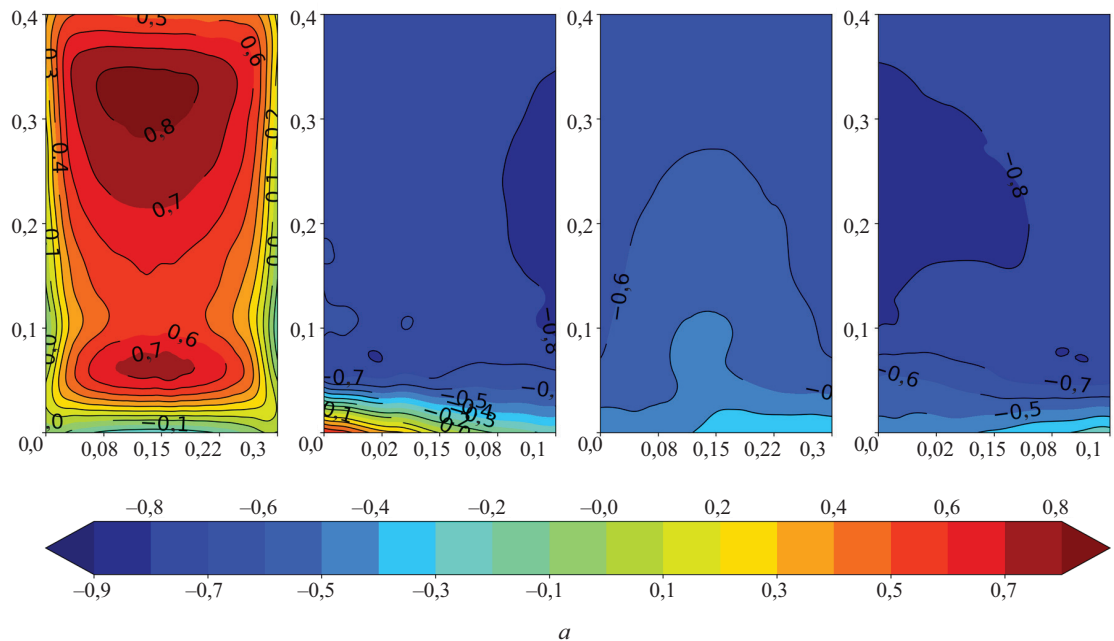


Рис. 5. Результаты прогнозирования аэродинамического коэффициента градиентным бустингом на здания $0,1 \times 0,1 \times 0,5$
Fig. 5. The results of aerodynamic coefficient prediction by the gradient boosting for buildings $0.1 \times 0.1 \times 0.5$

Табл. 2. Средняя взвешенная процентная ошибка для градиентного бустинга
Table 2. Mean weight absolute percentage error for gradient boosting

Габариты модели Model dimensions	Ошибка на грани 1, % Error on the facet 1, %	Ошибка на грани 2, % Error on the facet 2, %	Ошибка на грани 3, % Error on the facet 3, %	Ошибка на грани 4, % Error on the facet 4, %	Средняя погрешность Average error
0,1 × 0,1 × 0,5	9,3	10,9	7,6	9,0	9,2
0,3 × 0,1 × 0,4	13,0	15,5	7,4	13,3	12,3



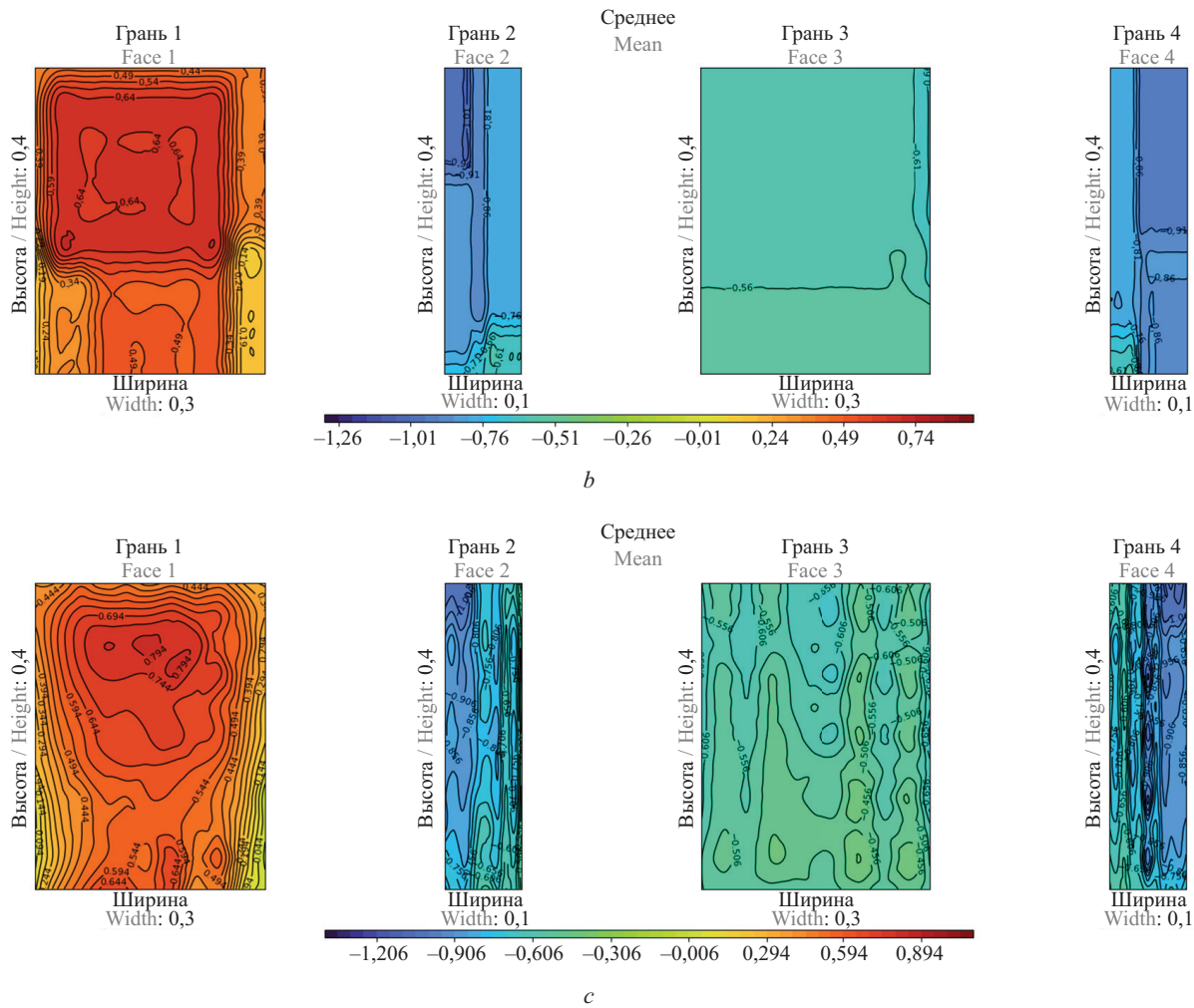


Рис. 6. Аэродинамические коэффициенты давления, полученные из испытаний в аэродинамической трубе (a); результаты прогнозирования дерева решений (b); результаты прогнозирования градиентного бустинга (c)
Fig. 6. Aerodynamic pressure coefficients obtained from wind tunnel tests (a); the results of decision tree prediction (b); the results of gradient boosting prediction (c)

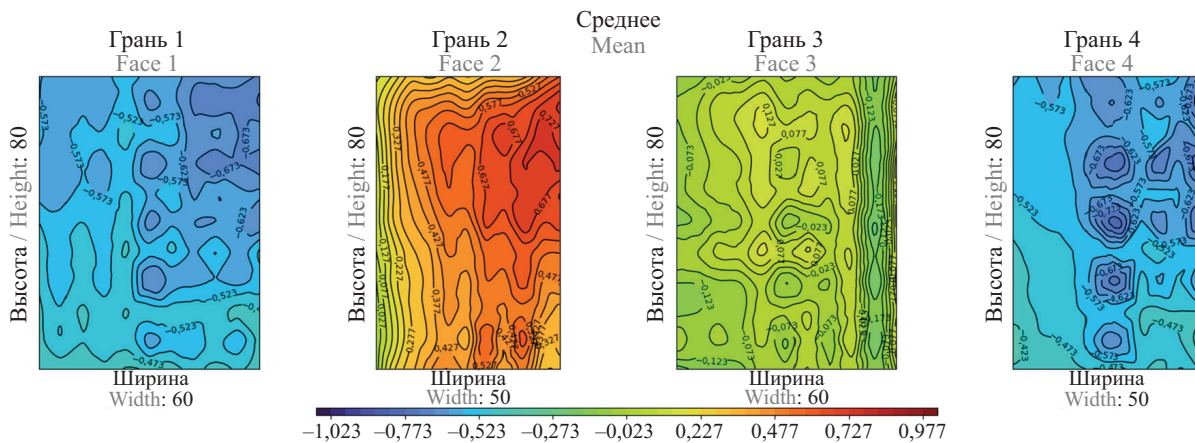


Рис. 7. Результаты прогнозирования аэродинамического коэффициента давления на дом размерами 60 × 50 × 80 при угле атаки ветра 122,5°
Fig. 7. Prediction results of aerodynamic pressure coefficient for a house with dimensions 60 × 50 × 80 at a wind attack angle of 122.5°

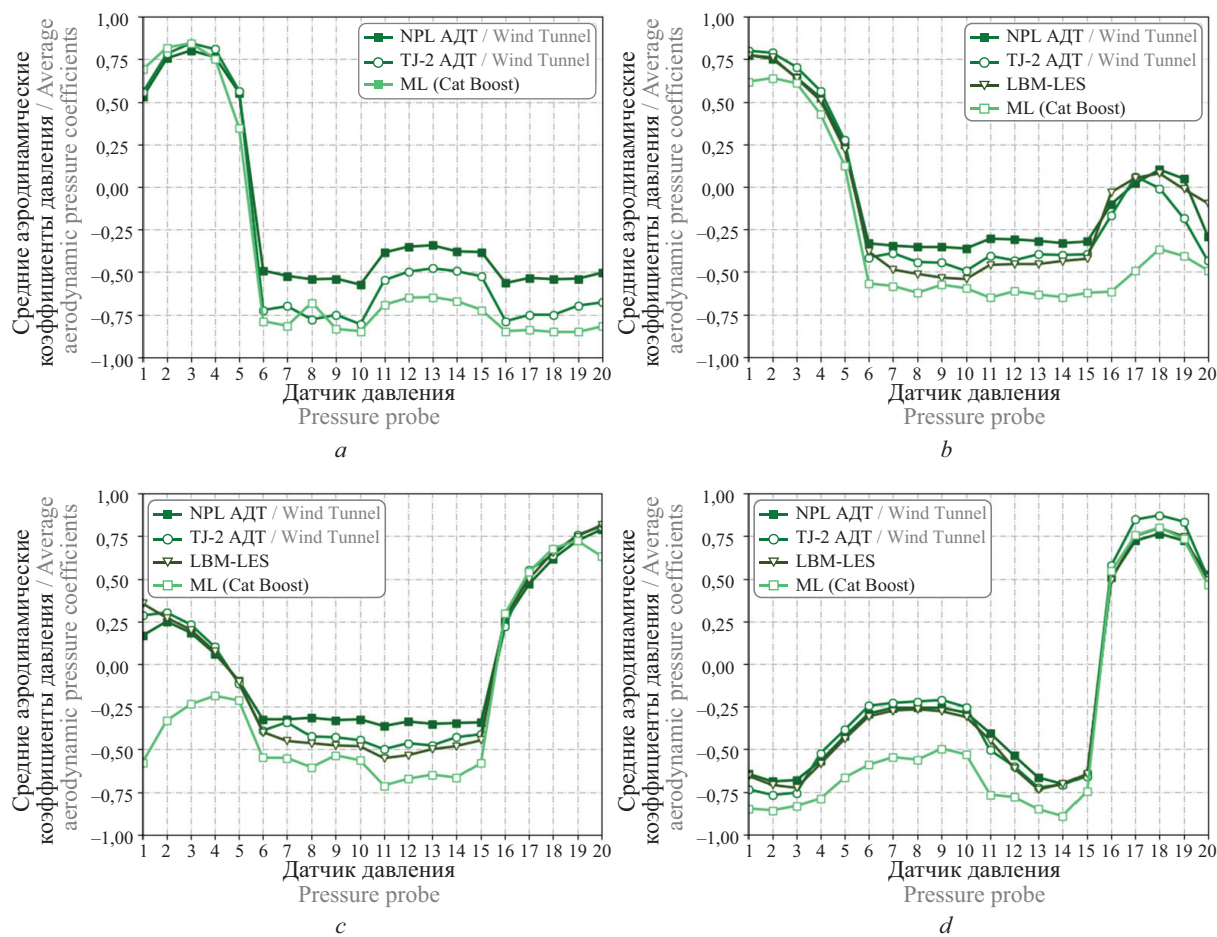


Рис. 8. Средние аэродинамические коэффициенты давления для различных углов атаки ветра: *a* — 0 градусов; *b* — 30 градусов; *c* — 60 градусов; *d* — 90 градусов

Fig. 8. Average aerodynamic pressures coefficients for different angles of the wind attack: *a* — 0 degrees; *b* — 30 degrees; *c* — 60 degrees; *d* — 90 degrees

Табл. 3. Средняя взвешенная процентная погрешность

Table 3. Mean weight absolute percentage error

АДТ/CFD-моделирование Wind Tunnel/CFD-modelling	Угол Angle	Погрешность, % Error, %
NPL Аэродинамическая труба Wind Tunnel	0	45,8
	30	79,8
	60	74,2
	90	34,2
TJ-2 Аэродинамическая труба Wind Tunnel	0	16,5
	30	51,7
	60	53,5
	90	32,0
LBM-LES	30	54,5
	60	44,6
	90	27,7

Средняя точность прогнозирования для всех углов ветровой атаки для дома $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ составила 15,6 %, для дома $0,3 \times 0,1 \times 0,4$ — 17,9 %.

Как можно заметить по приведенным выше результатам, решающее дерево является подходящим

методом со стороны средней точности прогнозирования, однако не отражает физические показатели решаемой задачи. На рис. 6 представлены реальные аэродинамические коэффициенты и результаты методов машинного обучения.

Градиентный бустинг не только увеличил точность предсказаний на 5,3 %, но и уловил физические зависимости в решаемой задаче. Кроме того, в результате обработки данных и создания дополнительных признаков стало возможным прогнозирование аэродинамического давления на дома произвольных размеров с различным углом атаки ветра (рис. 7).

Для дополнительной оценки качества результатов, предсказанных на основе ML-методов аэродинамических коэффициентов давления, была проведена валидация с результатами экспериментальных исследований в аэродинамических трубах, представленных в работе Мельбуерна [22] (рис. 8). В табл. 3 приведена средняя взвешенная процентная погрешность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показывают, что задачи прогнозирования ветровых воздействий на здания и сооружения прямоугольных форм могут успешно решаться с помощью методов машинного обучения, при этом наиболее высокую эффективность продемонстрировали ансамблевые методы (в частности, градиентный бустинг над решающим деревом).

Рассмотренные алгоритмы позволяют учесть нелинейные связи между множеством входных признаков (геометрические параметры здания, угол ветровой атаки, координаты датчиков и др.) и целевыми переменными (средние аэродинамические коэффициенты давления) при широкой вариации исходных данных.

Проанализированы методы формирования расширенной обучающей выборки (за счет аугментации данных методом интерполяции, слияния результатов из различных источников и перевода координат датчиков в относительные величины, что позволило существенно улучшить обобщающую способность моделей). Аугментация данных показала свою эффективность, так как объем исходной базы (около 85 тысяч строк) был увеличен более чем в 7 раз. Благодаря этому модели машинного обучения стали лучше воспринимать различные соотношения между размерами зданий, распределением датчиков по поверхностям и углами ветровой атаки, что особенно важно для прогнозирования нагрузок на случаи «вне» исходных условий.

На основе проведенной серии вычислительных экспериментов по выбору и настройке моделей (линейная регрессия, дерево решений, градиентный бустинг с применением библиотеки CatBoost и оптимизацией гиперпараметров с помощью Optuna) продемонстрировано, что линейная регрессия неспособна адекватно описать все многообразие физических закономерностей, связанных с ветровыми потоками. При этом деревья решений дают более высокую точность, но в ряде случаев искажают пространственное распределение давлений (проблема «кусковой» ап-

проксимации), а также хуже передают плавные физические переходы на поверхности фасадов. Градиентный бустинг над решающим деревом (CatBoost), напротив, показал наилучший компромисс между точностью и физической интерпретируемостью, уловив пространственные закономерности изменения аэродинамических коэффициентов по разным граням здания. Средняя погрешность по сравнению с эталонными данными в отдельных тестовых сценариях уменьшилась до 16–18 %.

Проведенная верификация результатов на моделях с «крайними» размерами (например, $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ и $0,3 \times 0,1 \times 0,4$) подтвердила, что для правильной передачи закономерностей необходимо формировать в обучающем датасете как можно более «разнообразные» геометрические конфигурации и сочетания углов ветровой атаки. При этом важно учитывать, что в реальных условиях здания могут иметь дополнительные элементы (балконы, выступающие карнизы, небольшие скругления и т.п.), а также окружающую застройку. Градиентный бустинг, в сравнении с другими алгоритмами машинного обучения, позволяет «дообучать» модель в случае появления новых данных, что является серьезным преимуществом по сравнению с классическими подходами, где для любого существенного изменения геометрии здания приходится заново проводить экспериментальные исследования в аэродинамических трубах, либо проводить CFD-моделирование.

Анализ корреляции признаков и оптимизация их набора доказали, что грамотно проведенная предварительная обработка данных (например, перевод категориальных и угловых характеристик в тригонометрический вид для учета периодичности, удаление признаков с мультиколлинеарностью) помогает повысить устойчивость и точность предсказаний. Это еще раз иллюстрирует необходимость детального рассмотрения физической сути признаков и удаления избыточных или «шумовых» характеристик.

Валидация с результатами экспериментальных исследований в АДТ свидетельствует о том, что градиентный бустинг «распознает» физические аспекты аэродинамики: закономерные переходы от наветренной к подветренной стороне, влияние высоты здания и соотношений сторон. Модель не только количественно приближается к эталонным данным, но и качественно воспроизводит распределение давлений. В практическом смысле это означает, что на основе предсказаний ML можно оценивать как интегральные показатели ветровой нагрузки (силы, моменты), так и локальные значения (особенно важные для расчета фасадных узлов и креплений).

Настоящая статья может послужить исходной точкой для дальнейших разработок, связанных с расширением возможностей прогнозных моделей на статистические характеристики ветровых воздействий на здания и сооружения на основе анализа временных рядов аэродинамических коэффициентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Stathopoulos T., Alrawashdeh H.* Wind loads on buildings: A code of practice perspective // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020. Vol. 206. P. 104338. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104338
2. *Сатанов А.А., Васин А.Д.* Экспериментальное исследование распределения ветрового давления на высотное здание уникальной формы // *Приволжский научный журнал*. 2021. № 3 (59). С. 38–46. EDN AANDEZ.
3. *Хазов П.А., Шилов С.С.* Геометрическая оптимизация аэродинамики высотного здания с интегрированными ветрогенераторами // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2024. Т. 24. № 3. С. 73–82. DOI: 10.14529/build240307. EDN VJYQQC.
4. *Yan B., Li Y., Li X., Zhou X., Wei M., Yang Q. et al.* Wind tunnel investigation of twisted wind effect on a typical super-tall building // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 12. P. 2260. DOI: 10.3390/buildings12122260
5. *Sari D.P., Cho K.P.* Performance Comparison of Different Building Shapes Using a Wind Tunnel and a Computational Model // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 144. DOI: 10.3390/buildings12020144
6. *Potsis T., Tominaga Y., Stathopoulos T.* Computational wind engineering: 30 years of research progress in building structures and environment // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Vol. 234. P. 105346. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105346
7. *Саиян С.Г., Васильев А.В.* Численное моделирование динамического отклика башни «Эволюция» при ветровом воздействии с учетом застройки и разрешением турбулентности // *Вестник МГСУ*. 2025. Т. 20. № 2. С. 246–279. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279
8. *Wijesooriya K., Mohotti D., Lee C.K., Mendis P.* A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 74. P. 106828. DOI: 10.1016/j.job.2023.106828
9. *Саиян С.Г., Ефимова А.М.* Расчетные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 6. С. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941. EDN OKQQFI.
10. *Wang X., Zhang G., Li Y., Kong H., Liu L., Zhang C.* Field Measurements of Wind-Induced Responses of the Shanghai World Financial Center during Super Typhoon Lekima // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Issue 14. P. 6519. DOI: 10.3390/s23146519
11. *Cheng X.X., Zhao L., Ge Y.J., Dong J., Peng Y.* Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Tests : Literature Review and Personal Perspectives // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 2. P. 782. DOI: 10.3390/app14020782
12. *Yi J., Li Q.S.* Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building // *Journal of Fluids and Structures*. 2015. Vol. 58. Pp. 236–253. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.08.005
13. *Charisi S., Thiis T.K., Aurlien T.* Full-scale measurements of wind-pressure coefficients in twin medium-rise buildings // *Buildings*. 2019. Vol. 9. Issue 3. P. 63. DOI: 10.3390/buildings9030063
14. *Wu T., Snaiki R.* Applications of machine learning to wind engineering // *Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.811460
15. *Alanani M., Elshaer A.* ANN-based optimization framework for the design of wind load resisting system of tall buildings // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 285. P. 116032. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116032
16. *Nikose T.J., Sonparote R.S.* Dynamic along wind response of tall buildings using Artificial Neural Network // *Cluster Computing*. 2019. Vol. 22. Issue S2. Pp. 3231–3246. DOI: 10.1007/s10586-018-2027-0
17. *Ding Y., Ye X.W., Guo Y.* Wind load assessment with the JPDF of wind speed and direction based on SHM data // *Structures*. 2023. Vol. 47. Pp. 2074–2080. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.028
18. *Oh B.K., Glisic B., Kim Y., Park H.S.* Convolutional neural network-based wind-induced response estimation model for tall buildings // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2019. Vol. 34. No. 10. Pp. 843–858. DOI: 10.1111/mice.12476
19. *Yetkin S., Abuhanieh S., Yigit S.* Investigation on the abilities of different artificial intelligence methods to predict the aerodynamic coefficients // *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 237. P. 121324. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121324
20. *Захаров Ф.Н., Цянь Ц., Сюй И.* Прогнозирование ветровой нагрузки на высотные здания с использованием ансамблевого метода объединения результатов // *Universum: технические науки*. 2024. № 11–4 (128). С. 66–75. DOI: 10.32743/UniTech.2024.128.11.18607. EDN UKMYTR.
21. *Саиян С.Г., Шелепина В.Б.* Прогнозирование аэродинамических коэффициентов на закручивающиеся формообразующие зданий и сооружений на базе машинного обучения и CFD-моделирования // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 5. С. 713–728. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.713-728. EDN HUZBDU.
22. *Melbourne W.H.* Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1980. Vol. 6. Issue 1–2. Pp. 73–88. DOI: 10.1016/0167-6105(80)90023-9

Поступила в редакцию 24 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 25 января 2025 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

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

Вероника Борисовна Шелепина — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; berenikas00@mail.ru.

Вклад авторов:

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

Шелепина В.Б. — концепция исследования, обработка данных, обучение моделей, создание иллюстраций, обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Stathopoulos T., Alrawashdeh H. Wind loads on buildings: A code of practice perspective. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020; 206:104338. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104338
2. Satanov A.A., Vasin A.D. Experimental study of wind pressure distribution on a unique shape high-rise building. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2021; 3(59):38-46. EDN AANDEZ. (rus.).
3. Khazov P.A., Shilov S.S. Geometric optimization of the aerodynamics of a high-rise building with a built-in wind generator. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2024; 24(3):73-82. DOI: 10.14529/build240307. EDN VJYQQC. (rus.).
4. Yan B., Li Y., Li X., Zhou X., Wei M., Yang Q. et al. Wind tunnel investigation of twisted wind effect on a typical super-tall building. *Buildings*. 2022; 12(12):2260. DOI: 10.3390/buildings12122260
5. Sari D.P., Cho K.P. Performance Comparison of Different Building Shapes Using a Wind Tunnel and a Computational Model. *Buildings*. 2022; 12(2):144. DOI: 10.3390/buildings12020144
6. Potsis T., Tominaga Y., Stathopoulos T. Computational wind engineering: 30 years of research progress in building structures and environment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023; 234:105346. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105346
7. Saiyan S.G., Vasiliev A.V. Numerical Simulation of the Dynamic Response of the “Evolution” Tower under Wind Action Considering Surrounding Buildings and Turbulence Resolution. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(2):246-279. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279 (rus.).
8. Wijesooriya K., Mohotti D., Lee C.K., Mendis P. A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future. *Journal of Building Engineering*. 2023; 74:106828. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106828
9. Saiyan S.G., Efimova A.M. Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-city” complex during sequential construction of buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):906-941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941. EDN OKQQFI. (rus.).
10. Wang X., Zhang G., Li Y., Kong H., Liu L., Zhang C. Field Measurements of Wind-Induced Responses of the Shanghai World Financial Center during Super Typhoon Lekima. *Sensors*. 2023; 23(14):6519. DOI: 10.3390/s23146519
11. Cheng X.X., Zhao L., Ge Y.J., Dong J., Peng Y. Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Tests : Literature Review and Personal Perspectives. *Applied Sciences*. 2024; 14(2):782. DOI: 10.3390/app14020782
12. Yi J., Li Q.S. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building. *Journal of Fluids and Structures*. 2015; 58:236-253. DOI: 10.1016/j.jfluidstruct.2015.08.005
13. Charisi S., Thiis T.K., Aurlen T. Full-scale measurements of wind-pressure coefficients in twin medium-rise buildings. *Buildings*. 2019; 9(3):63. DOI: 10.3390/buildings9030063
14. Wu T., Snaiki R. Applications of machine learning to wind engineering. *Frontiers in Built Environment*. 2022; 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.811460
15. Alanani M., Elshaer A. ANN-based optimization framework for the design of wind load resisting

system of tall buildings. *Engineering Structures*. 2023; 285:116032. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116032

16. Nikose T.J., Sonparote R.S. Dynamic along wind response of tall buildings using Artificial Neural Network. *Cluster Computing*. 2019; 22(S2):3231-3246. DOI: 10.1007/s10586-018-2027-0

17. Ding Y., Ye X.W., Guo Y. Wind load assessment with the JPDF of wind speed and direction based on SHM data. *Structures*. 2023; 47:2074-2080. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.028

18. Oh B.K., Glisic B., Kim Y., Park H.S. Convolutional neural network-based wind-induced response estimation model for tall buildings. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2019; 34(10):843-858. DOI: 10.1111/mice.12476

19. Yetkin S., Abuhanieh S., Yigit S. Investigation on the abilities of different artificial intelligence methods to predict the aerodynamic coefficients. *Expert Systems*

with Applications. 2024; 237:121324. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121324

20. Zakharov F., Qian J., Xu Yi. Forecasting wind loads on high-rise buildings using the ensemble method of combining results. *Universum*. 2024; 11-4(128):66-75. DOI: 10.32743/UniTech.2024.128.11.18607. EDN UKMYTR. (rus.).

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

22. Melbourne W.H. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1980; 6(1-2):73-88. DOI: 10.1016/0167-6105(80)90023-9

Received January 24, 2025.

Adopted in revised form on January 25, 2025.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S: **Sergey G. Saiyan** — researcher at the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865, ResearcherID: AAT-1424-2021; Berformert@gmail.com;

Veronica B. Shelepina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; berenikas00@mail.ru.

Contribution of the authors:

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

Veronica B. Shelepina — research concept, data processing, model training, illustration creation, processing and analysis of research results, writing the text of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Экспериментальное исследование прочности и выносливости клееной древесины на скалывание, сжатие и изгиб

Александр Николаевич Шувалов¹, Олег Александрович Корнев¹,
Владимир Анатольевич Какуша¹, Юрий Алексеевич Жидков¹,
Анна Владимировна Корнилова¹, Валентин Алексеевич Ермаков¹,
Дмитрий Егорович Капустин¹, Максим Владимирович Федоров¹,
Алексей Вячеславович Насоновский²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Сооружения инженерно-транспортной инфраструктуры (СИТИ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время дерево возвращает свои позиции как материал для мостов. За первые десятилетия XXI в. в России доля деревянного мостостроения выросла с 10 до 40 %. Стоимость пролетного строения мостов из клееной древесины на 30–50 % ниже стоимости пролетного строения моста из сборных предварительно напряженных железобетонных конструкций. Актуальной задачей современного мостостроения является расширение области применения клееной древесины для сложных и протяженных конструкций. Для этого необходима актуализация существующих и разработка новых нормативных документов, которая, в свою очередь, невозможна без экспериментальных исследований действительной работы элементов строительных конструкций из клееной древесины.

Материалы и методы. Исследовали предел выносливости образцов из клееной древесины при скалывании вдоль волокон и сжатии поперек волокон, предел выносливости клееных деревянных балок при изгибе, провели контроль остаточной прочности не разрушившихся после циклических испытаний образцов.

Результаты. Статистическая обработка экспериментальных результатов позволила выявить особенности деформирования и разрушения клееной древесины: предел выносливости при циклическом изгибе до 10 раз выше, чем предел выносливости при циклическом скалывании и сжатии, что лишний раз подчеркивает высокий уровень анизотропии материала. Это существенно больше, чем для других строительных материалов.

Выводы. Статические испытания показали практически равномерную линейную работу клееных образцов при испытаниях на сжатие поперек волокон. Анализ разрушений позволил сделать вывод о надежности клеевых соединений. Выявлено, что при увеличении влажности на 1 % прочность уменьшается на 0,4 %. Следовательно, для мостовых конструкций вопросы влагостойкости клееной древесины остаются актуальными. Результаты исследований использованы при разработке проектов национальных стандартов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: клееная древесина, скалывание вдоль волокон, сжатие поперек волокон, предел прочности, выносливость, остаточная прочность, коэффициент асимметрии цикла

Благодарности. НИОКР выполнялись по заказу ООО «Сооружения инженерно-транспортной инфраструктуры» (ООО «СИТИ») в соответствии с договором с Росавтодором во исполнение государственных контрактов № 32/1-2022 и № 33/1-2022. Программа исследований выполнена А.В. Насоновским, главным инженером проекта ООО «СИТИ». Результаты исследований использованы при разработке проектов национальных стандартов ГОСТ Р 71594–2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Проектирование элементов из клееной древесины» и ГОСТ Р 71595–2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Технические требования к несущим элементам из клееной древесины».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шувалов А.Н., Корнев О.А., Какуша В.А., Жидков Ю.А., Корнилова А.В., Ермаков В.А., Капустин Д.Е., Федоров М.В., Насоновский А.В. Экспериментальное исследование прочности и выносливости клееной древесины на скалывание, сжатие и изгиб // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 394–408. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.394-408

Автор, ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Ермаков, ermakov@mgsu.ru.

Experimental study of the strength and endurance of glued timber on shearing, compression and bending

Aleksandr N. Shuvalov¹, Oleg A. Kornev¹, Vladimir A. Kakusha¹, Yuri A. Zhidkov¹,
Anna V. Kornilova¹, Valentin A. Ermakov¹, Dmitrii E. Kapustin¹, Maxim V. Fedorov¹,
Aleksey V. Nasonovskiy²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Engineering and Transport Infrastructure Facilities; St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Nowadays wood is regaining its position as a material for bridges. During the first decades of the 21st century, the share of wooden bridge construction in Russia increased from 10 to 40 %. The cost of a bridge span made of glued laminated timber is 30–50 % lower than the cost of a bridge span made of precast prestressed reinforced concrete structures. Consequently, an urgent task of modern bridge construction is to expand the scope of application of glued laminated timber for complex and extended structures. This requires updating existing and developing new regulatory documents, which, in turn, is impossible without experimental studies of the actual operation of elements of building structures made of glued laminated timber.

Materials and methods. The endurance limit of glued timber specimens during shearing along the fibres and compression across the fibres, the endurance limit of glued timber beams during bending, and control of the residual strength of specimens that did not fail after cyclic testing were studied.

Results. Statistical processing of experimental results allowed us to identify the features of deformation and destruction of glued timber: the endurance limit for cyclic bending is up to 10 times higher than the endurance limit for cyclic shearing and compression, which once again emphasizes the high level of anisotropy of the material. This is significantly more than for other building materials.

Conclusions. Static tests showed practically uniform linear operation of glued specimens during compression tests across the fibres. Analysis of destruction allowed us to draw a conclusion about the reliability of adhesive joints. It was found that with an increase in humidity by 1 %, the strength decreases by 0.4 %. Consequently, for bridge structures, the issues of moisture resistance of glued timber remain relevant. The results of the studies were used in the development of national standards projects.

KEYWORDS: glued laminated timber, shear along the fibres, compression across the fibres, tensile strength, fatigue strength, residual strength, cycle asymmetry coefficient

Acknowledgments. The R & D work was performed by order of Engineering and Transport Infrastructure Facilities LLC in accordance with the agreement with Rosavtodor pursuant to state contracts No. 32/1-2022 and No. 33/1-2022. The research programme was completed by A.V. Nasonovsky, Chief Engineer of the Engineering and Transport Infrastructure Facilities LLC project. The research results were used in the development of national standards projects GOST R 71594–2024 “Public highways. Bridge structures. Design of glued laminated timber elements” and GOST R 71595–2024 “Public highways. Bridge structures. Technical requirements for load-bearing elements made of glued laminated timber”.

FOR CITATION: Shuvalov A.N., Kornev O.A., Kakusha V.A., Zhidkov Yu.A., Kornilova A.V., Ermakov V.A., Kapustin D.E., Fedorov M.V., Nasonovskiy A.V. Experimental study of the strength and endurance of glued timber on shearing, compression and bending. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):394–408. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.394-408 (rus.).

Corresponding author: Valentin A. Ermakov, ermakov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Специфика географического положения российского государства накладывает отпечаток на развитие отечественного мостостроения [1] и применяемые для него материалы. Древесина — один из первых строительных материалов, используемых для строительства мостов. Прочность, гибкость, сравнительная простота обработки с помощью несложных технологий — по совокупности этих свойств у древесины долго не было конкурентов.

В исторических материалах приводятся сведения о мостах, построенных при Ярославе Мудром, Владимире Мономахе, Дмитрии Донском. Задokumentировано, что на Руси деревянные мосты строили

начиная с XI–XII вв.¹ Применялись различные способы постройки мостов: с опорами в виде сруба, городской и бревенчатый настил полотна. Эти конструкции обрабатывались топором, так как пила вошла в употребление только в XVIII в. Изначально мосты возводились лишь в больших городах или в местах, где необходимо организовать переправу войскам. С появлением дорог и развитием торговли мосты разных размеров стали возводиться повсеместно.

Один из старейших сохранившихся деревянных мостов находится в пос. Берёзово — деревянный ряжевый мост через Култычный овраг построен приблизительно в конце XVIII в. (рис. 1, а). Его шири-

¹ Ряжевые мосты Русского Севера. URL: <https://dzen.ru/a/ZDaQHjKOTFKPRrg3>



a



b

Рис. 1. Деревянный мост в пос. Берёзово (Ханты-Мансийский автономный округ) (a); мост в д. Измайловская (Архангельская область) (b)

Fig. 1. Wooden bridge in the village of Berezovo (Khanty-Mansiysk Autonomous district) (a); bridge in the village of Izmailovskaya (Arkhangelsk Region) (b)

на — 6 м, длина — 50 м. В настоящее время мост используется только пешеходами. Второй сохранившийся деревянный мост XVIII в. через р. Кена в Архангельской области (рис. 1, b) — семипролетный мост «на городнях» — срубленных из дерева и заполненных камнями быках в форме лодок. Длина моста — 126 м. До 90-х годов XX в. ряжевые мосты использовались по назначению. При должном уходе и своевременном ремонте эти деревянные мосты могли стоять веками.

Со времен Петра I в России началось интенсивное мостостроение. Открытый в 1705 г. в Петербурге первый мост города был наплавным, но вместо плотов использовали барки-плашкоуты. Такие мосты строились в Петербурге в XVIII и XIX вв., наиболее примечательным из них был Исаакиевский. Выдающимся достижением мостостроения XVIII в. стал проект первого в мире арочного моста через Неву И.П. Кулибина (рис. 2). Предусматривалось, что деревянная арка с пролетом 300 м перекрывала бы реку. Было сделано три макета, на которых проводились испытания, но ни один из них так и не реализован [2].

Начиная с 50-х годов XX в. древесину начали замещать железобетоном, сталью и чугуном. Но, как показывает анализ статистических данных, за первые десятилетия XXI в. в России доля деревянного мостостроения выросла с 10 до 40 % [3]. По информации государственной службы дорожного хозяйства на территориальных автомобильных дорогах каждый четвертый мост — деревянный.

Больше всего таких сооружений в Читинской области — 947, Архангельской области — 843, в Хабаровском крае — 726, в Республике Саха (Якутия) — 486, Республике Бурятия — 415, в Иркутской области — 448, в Республике Карелия — 383. На федеральных автомобильных дорогах эксплуатируются 82 деревянных моста: в Республике Саха (Якутия) — 42, в Амурской области — 22, в Иркутской области — 4, в Магаданской области — 4, в Еврейской АО — 3, в Калужской области — 2, в Читинской области — 2, в Агинском Бурятском АО — 1, в Республике Бурятия — 1, в Республике Тыва — 1².

За последние годы более двух десятков современных деревянных мостов по всей России спроектировали и построили сотрудники лаборатории деревянных конструкций Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. Кучеренко) [4]. Наиболее значимым из них является мост через МКАД (рис. 3), так как он был первым вантовым деревянным мостом в нашей стране, хотя многие специалисты не верили, что подобную конструкцию можно соорудить из древесины. Но именно она была одобрена конкурсной комиссией по ряду показателей, в том числе и экономических. Сметная стоимость такого моста длиной 105 м оказалась на 20 % ниже,

² Шепотило М. Как деревянному мостостроению в России выйти из кризиса? // ЛЕСПРОМИНФОРМ. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3688>



a



b

Рис. 2. Проект моста И.П. Кулибина
Fig. 2. Project of the bridge by I.P. Kulibin

Рис. 3. Пешеходный мост на 102-м км МКАД
Fig. 3. Pedestrian bridge at 102 km of the Moscow Ring Road



Рис. 4. Мост до обрушения (а) и обрушение деревянного моста (b) у д. Треттен (Норвегия)

Fig. 4. Bridge before collapse (a) and collapse of the wooden bridge (b) near the village of Tretten (Norway)

чем моста длиной 60 м, предложенного австрийской фирмой.

Начиная с 70-х гг. прошлого века сделано несколько попыток использования клееной древесины в отечественном мостостроении. Первый мост из клееной древесины построен в Воронеже [4]. Тогда же «Союздорпроект» занимался строительством автомобильного моста из балок Хотьковского экспериментального завода. Но опыт оказался неудачным из-за нарушений технологии изготовления клееных конструкций². После 1975 г. были удачные попытки в деревянном мостостроении благодаря появлению отрасли промышленного производства клееных деревянных конструкций. ЦНИИСК продолжает работу над применением клееной древесины для строительства в сейсмоопасных районах [5] и для большепролетных сооружений [6]. Вопросам надежности работы клееной древесины посвящен ряд работ [7, 8], в том числе диссертационные исследования [9, 10].

Анализ зарубежных публикаций по исследуемой теме показал, что дерево возвращает свои позиции как материал для мостов, особенно в странах Северной Европы. Это касается не только пешеходных мостов, но и крупных автомобильных мостов для полной транспортной нагрузки. Сегодня эксплуатируется около 200 деревянных мостов [11]. В Швеции построено 817 деревянных мостов между 1994 и 2013 гг.: 501 были пешеходными, 316 — полноценными транспортными. Это составляет примерно 25 % всех мостов, построенных в этот период. Кроме того, с 1995 г. ежегодно строится около 40 деревянных мостов, в основном пешеходных и велосипедных [12].

Тем не менее эксплуатация деревянных мостов пока не обходится без аварий. Обрушение моста в д. Треттен в Норвегии (рис. 4) в августе 2022 г.³ показало значимость повышения качества проектирования и проведения мониторинга состояния конструкции деревянных мостов, методика которого практически отсутствует. Возрождение деревянных мостов также подпитывает исследования в области динамической оценки и требований к удобству обслуживания. Практически все зарубежные работы посвящены динамическому анализу [13–16] и демпфирующим свойствам древесины [17].

По мнению специалистов, обрушение произошло из-за преобладающего внимания к комфорту пользователей и эстетике сооружения в ущерб прочностным характеристикам и отсутствия должного мониторинга состояния конструкции [17]. Актуальных зарубежных исследований по усталостной долговечности (выносливости) в рассматриваемой области практически нет. За исключением исследования [18], в котором описаны полномасштабные испытания двух мостов из клееной древесины, которые не показали никаких признаков усталостного износа на протяжении 500 000 циклов нагрузки AASHTO Fatigue II (эквивалентно 91 году службы), а общая жесткость мостов оставалась постоянной на протяжении всего испытания на усталость. Анализ затрат [18] показал, что стоимость пролетного строения мостов из клееной древесины может быть на 30–50 %

³ Blokkutriving etter overbelasting felte tretten bru / Statens vegvesen. 02.12.2022. URL: <https://www.vegvesen.no/om-oss/presse/aktuelt/2022/12/blokkutriving-etter-overbelasting-felte-tretten-bru/>

ниже стоимости пролетного строения моста из сборных предварительно напряженных железобетонных конструкций.

В российской нормативной документации в соответствии с СП 35.13330.2011⁴ деревянные мосты допускается проектировать на автомобильных дорогах IV и V категорий по ГОСТ Р 52398⁵. Данные категории дорог, согласно ГОСТ Р 52398⁵, характеризуются как дороги обычного типа с одной или двумя полосами движения. При этом длина пролетных строений не оговаривается. Раздел по расчету на выносливость для деревянных мостов в СП 35.13330.2011⁴ отсутствует. Расчет элементов из клееной древесины на выносливость представлен в Пособии по проектированию деревянных конструкций к СНиП II-25-80⁶, который предшествовал СП 64.13330.2017⁷. В СП 64.13330.2017 расчеты на выносливость также отсутствуют. В зарубежных нормативных документах (Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2: Bridges⁸) расчет на выносливость присутствует, но в упрощенной форме. Проверку элементов на усталость проводят, если коэффициент k (ratio for fatigue verification) превышает табличное значение, характерное для видов напряженно-деформированного состояния элементов и соединений.

Таким образом, принимая во внимание мировой и отечественный опыт строительства деревянных мостов, развитие науки и техники, задача расширения области применения клееной древесины для более сложных и протяженных мостовых конструкций является актуальной.

Решение данной задачи невозможно без экспериментальных исследований действительной работы элементов строительных конструкций из клееной древесины.

Определяющей характеристикой материалов в работе мостовых конструкций служит выносливость. В связи с этим настоящее исследование направлено на изучение:

- 1) предела выносливости образцов клееной древесины при скалывании вдоль волокон;
- 2) предела выносливости образцов клееной древесины при сжатии поперек волокон;
- 3) предела выносливости клееных деревянных балок при изгибе;
- 4) контроль остаточной прочности не разрушившихся после циклических испытаний образцов.

⁴ СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*.

⁵ ГОСТ Р 52398–2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования.

⁶ СНиП II-25–80. Деревянные конструкции : утв. постановлением Госстроя СССР от 18.12.1980 № 198.

⁷ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80.

⁸ EN 1995-2:2004 (MAIN). Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2: Bridges.

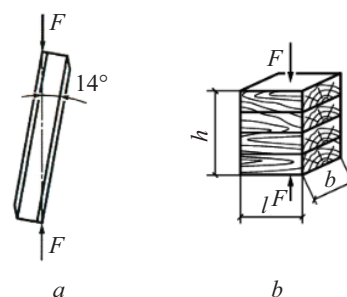


Рис. 5. Схема нагружения образцов: при испытаниях на скалывание вдоль волокон (а); при испытаниях на сжатие поперек волокон (b)

Fig. 5. Specimen loading scheme: during shear tests along the fibres (a); during compression tests across the fibres (b)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Статические испытания образцов клееной деревянной конструкции на скалывание вдоль волокон и сжатие поперек волокон проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 33081–2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Классы прочности элементов конструкций и методы их определения». Схемы нагружения представлены на рис. 5.

Сжимающее усилие F прикладывалось непрерывно с постоянной скоростью нагружения 2 мм/мин. Прочность при скалывании вдоль волокон определялась по формуле:

$$R_{\text{СК}} = F_{\text{СК}} \cdot \frac{\cos 14^\circ}{A_{\text{СК}}},$$

где $F_{\text{СК}}$ — наибольшее усилие, предшествующее разрушению образца; $A_{\text{СК}}$ — площадь скалывания.

Прочность на сжатие поперек волокон $R_{\text{с}(0,90)}$, МПа, вычислялась по формуле:

$$R_{\text{с}(0,90)} = \frac{F_{\text{п.п.}}}{A_{\text{поп}}},$$

где $F_{\text{п.п.}}$ — нагрузка, соответствующая пределу прочности; $A_{\text{поп}}$ — площадь поперечного сечения образца.

Дополнительно для занесения в протокол испытаний непосредственно перед испытаниями осуществлялся контроль влажности в соответствии с ГОСТ 16588–91⁹, а также продолжительность испытаний по их завершении.

По результатам испытаний всех образцов определялось среднее значение прочности в серии образцов, стандартное отклонение и коэффициент вариации.

Так как при сжатии поперек волокон на диаграмме деформирования отсутствует максимум, для установления предела прочности использовалась нагрузка

⁹ ГОСТ 16588–91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности.

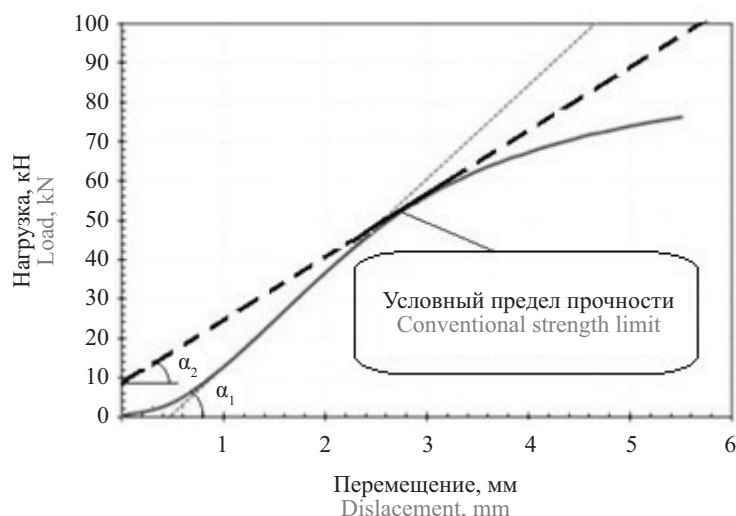


Рис. 6. Пример определения нагрузки, соответствующей условному пределу прочности при сжатии поперек волокон
Fig. 6. Example of determining the load corresponding to the conditional ultimate strength under compression across the fibres

ка, соответствующая условному пределу прочности, определяемая согласно п. 4.1 ГОСТ 16483.11–72¹⁰.

Таким образом, нагрузка, соответствующая условному пределу прочности, устанавливалась по диаграмме сжатия поперек волокон (рис. 6) как ордината точки, в которой отступление от линейной зависимости между нагрузкой и деформацией достигало такой величины, что тангенс угла, образованного осью перемещений и касательной к графику, уменьшался на 50 % своего значения, соответствующего прямолинейному участку графика, т.е. когда отношение $\tan \alpha_2 / \tan \alpha_1$ становилось равным 1,5.

¹⁰ ГОСТ 16483.11–72. Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон.

Усталостные испытания проводились в соответствии с ГОСТ 25.502–79¹¹ на базе $2 \cdot 10^6$ циклов при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0,2$. При этом использовались аналогичные статическим испытаниям образцы и схемы их нагружения (рис. 5). Дополнительно также контролировалась влажность образцов.

В пределах намеченной серии испытаний все образцы нагружались одним способом. Испытания образцов осуществлялись до полного разрушения или до достижения базового числа циклов. В процес-

¹¹ ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

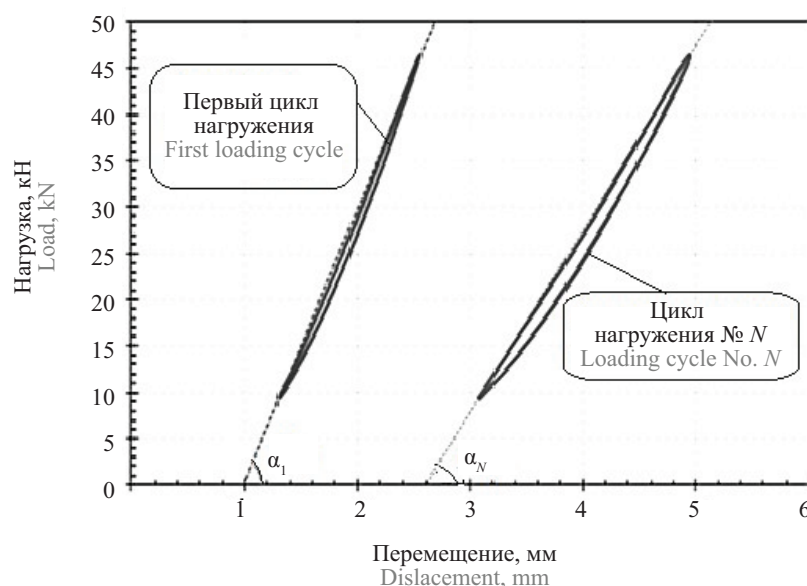


Рис. 7. Схема определения момента наступления критерия разрушения

Fig. 7. Scheme for determining the moment of occurrence of the destruction criterion

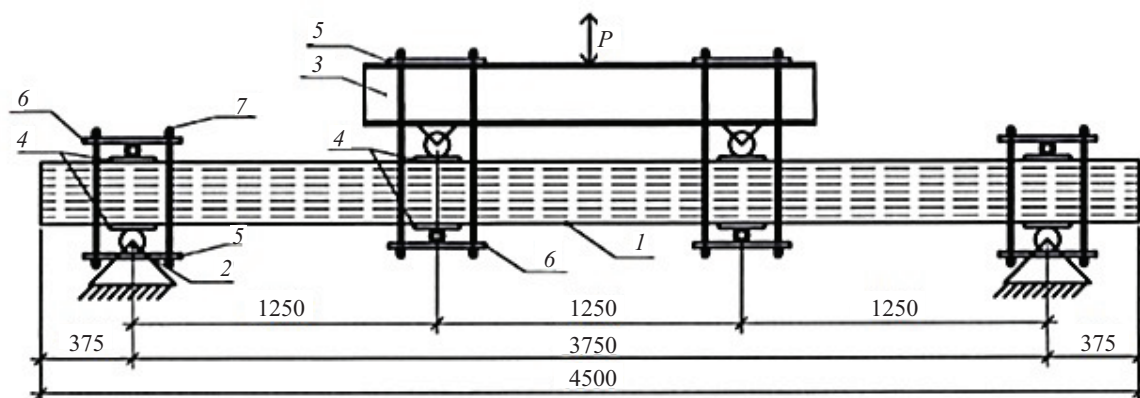


Рис. 8. Схема создания симметричного цикла нагружения: 1 — образец балка (клееная деревянная конструкция); 2 — опорная часть; 3 — траверса; 4, 5, 6 — распределительная пластина; 7 — стяжка

Fig. 8. Scheme of creation of symmetrical loading cycle: 1 — beam sample (glued timber structure); 2 — support part; 3 — crossbar; 4, 5, 6 — distribution plate; 7 — tie

се испытания образцов контролировалась стабильность задаваемых нагрузок.

По результатам испытаний на усталость выполнялись построение кривой усталости и определение предела выносливости.

Основным критерием разрушения при установлении пределов выносливости на скалывание вдоль волокон и построении кривых усталости являлось полное разрушение образцов.

Однако, так как при испытаниях на сжатие разрушение образцов не происходило, в данной работе за критерий условного разрушения при циклическом нагружении принимался момент, когда на диаграмме «нагрузка — перемещение» тангенс угла, образованного осью перемещений и прямой, проведенной между точками с максимальной и минимальной нагрузками цикла, увеличивался на 50 % (рис. 7), т.е. отношение $\tan \alpha_N / \tan \alpha_1$ становилось равным 1,5.

Образцы, выдержавшие 2 млн циклов нагружения без разрушения, подвергались статическим испытаниям для определения остаточной прочности в соответствии с ГОСТ 33081–2014¹².

При проведении научно-исследовательской работы применялось нагружающее и измерительное оборудование: реконфигурируемая система АВРОРА-50019 для испытаний крупноразмерных конструкций на статические и динамические нагрузки с усилием до 1000 кН; напорная серво-гидравлическая машина для статических и динамических испытаний Instron 8802 с максимальной нагрузкой до 250 кН; электронный измеритель влажности Testo 606-1; датчики линейного перемещения SDP-100E.

Усталостные испытания на изгиб при циклическом приложении нагрузки выполнены с двумя ко-

эффициентами асимметрии цикла 0,2 и –1. Схема испытаний при симметричном цикле ($R = -1$) показана на рис. 8. Регистрацию перемещения траверсы осуществляли при достижении следующих циклов нагружения: $1 \cdot 10^3$; $2,5 \cdot 10^3$; $5 \cdot 10^3$; $7,5 \cdot 10^3$; $10 \cdot 10^3$; $15 \cdot 10^3$; $20 \cdot 10^3$; $40 \cdot 10^3$; $60 \cdot 10^3$; $80 \cdot 10^3$; $100 \cdot 10^3$ и далее с шагом $5 \cdot 10^3$ до разрушения либо до базового числа циклов $2 \cdot 10^6$.

Испытания проводились при нормальных условиях окружающей среды, т.е. температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ и относительной влажности воздуха $65 \pm 5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам испытаний построены регрессионные модели и оценена их адекватность экспериментальным данным (табл. 1). В табл. 1 приняты следующие обозначения: Dl — длительность испытания, с; Vl — влажность древесины, %; Pr — экспериментально определенный предел прочности древесины, МПа.

Анализ экспериментальных данных и построенных на их основе регрессионных моделей (рис. 9) позволяет сделать вывод о практически равномерной линейной работе клееных образцов, без скачков и выбросов значений при испытаниях на сжатие поперек волокон (рис. 9, б), о менее равномерной — при испытаниях на скалывание вдоль волокон (рис. 9, а).

Локализация разрушений при статических испытаниях на скалывание вдоль волокон показана на рис. 10.

Анализ диаграммы показывает, что основная часть разрушений при испытаниях на скалывание вдоль волокон приходилась на древесину и клеевое соединение «древесина — сталь» — 67 %, из них 42 % — на разрушение, в котором превалировало разрушение по древесине, остальные разрушения приходились на клеевое соединение (17 и 8 %), что свидетельствует о надежности клеевых соединений.

¹² ГОСТ 33081–2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Классы прочности элементов конструкций и методы их определения.

Табл. 1. Регрессионные модели, связывающие длительность испытаний, влажность и предел прочности образцов
Table 1. Regression models linking test duration, humidity and tensile strength of samples

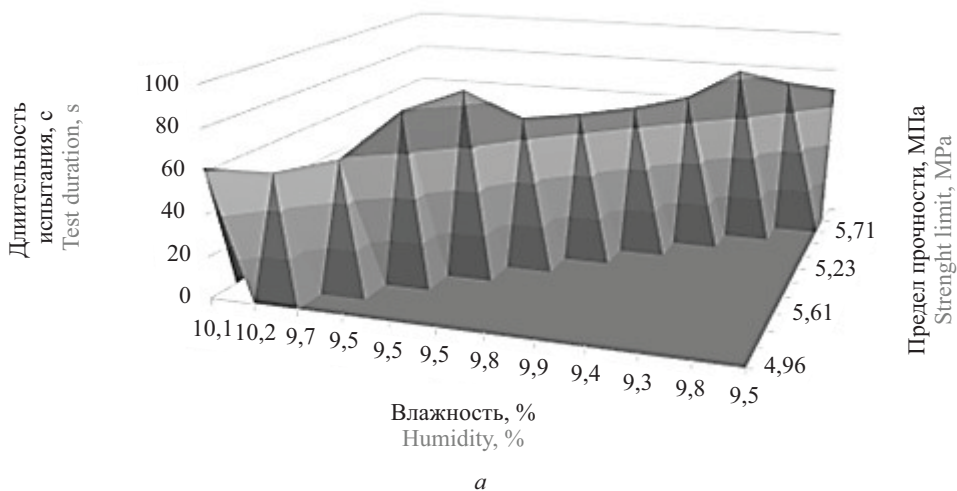
Испытания на скалывание вдоль волокон / Fibre spalling tests	
Испытания на сдвиг вдоль волокон / Shear tests along fibres	
$DI = 0,996 \cdot (14,96 \cdot Pr \cdot 6,53) \cdot (-0,198 \cdot VI + 2,92)$	
Точность аппроксимации Approximation accuracy	
Доверительная вероятность по критерию Фишера Confidence probability according to the Fisher criterion	88,8 %
Коэффициент Тейла / The Tail coefficient	0,089
Ограничения параметров модели Limitations of model parameters	
$49,90 \leq DI \leq 104,60; 9,30 \leq VI \leq 10,2; 4,43 \leq Pr \leq 6,08$	
Испытания на сжатие поперек волокон Compression tests across fibers	
$DI = (16,60 \cdot Pr + 46,27) \cdot (0,01 \cdot VI + 0,89)$	
Точность аппроксимации Approximation accuracy	
Доверительная вероятность по критерию Фишера Confidence probability according to the Fisher criterion	99,3 %
Коэффициент Тейла / The Tail coefficient	0,034
Ограничения параметров модели Limitations of model parameters	
$76,40 \leq DI \leq 99,8; 9,70 \leq VI \leq 11,60; 2,12 \leq Pr \leq 2,92$	

По результатам испытаний на циклическое скалывание вдоль волокон, сжатие поперек волокон, а также циклический изгиб (рис. 8) определялись пределы выносливости образцов (табл. 2) на базе $2 \cdot 10^6$ циклов:

- при скалывании и сжатии с частотой 10 Гц и коэффициенте асимметрии $R = 0,2$;
- при изгибе с коэффициентом асимметрии $R = 0,2$ с частотой от 1,2 до 3 Гц;
- при изгибе с коэффициентом асимметрии $R = -1$ с частотой от 0,4 до 4 Гц.

На рис. 11 приведена графическая зависимость предела выносливости при изгибе от коэффициента

асимметрии цикла. Испытания клееной древесины показали влияние коэффициента асимметрии цикла на усталостные характеристики. Это соответствует аналогичным зависимостям для других материалов. Но обнаружено существенное отличие от поведения металлов и сплавов при циклических испытаниях клееных конструкций. На предел выносливости пре-валирующее значение оказывает схема нагружения. Предел выносливости при циклическом изгибе до 10 раз выше, чем предел выносливости при циклическом скалывании и сжатии (при одном значении коэффициента асимметрии цикла), что лишний раз подчеркивает высокий уровень анизотропии мате-



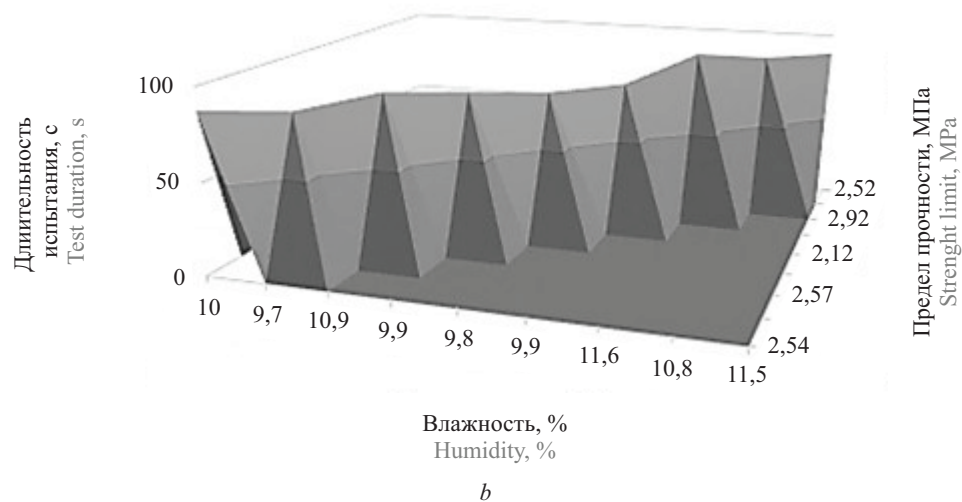
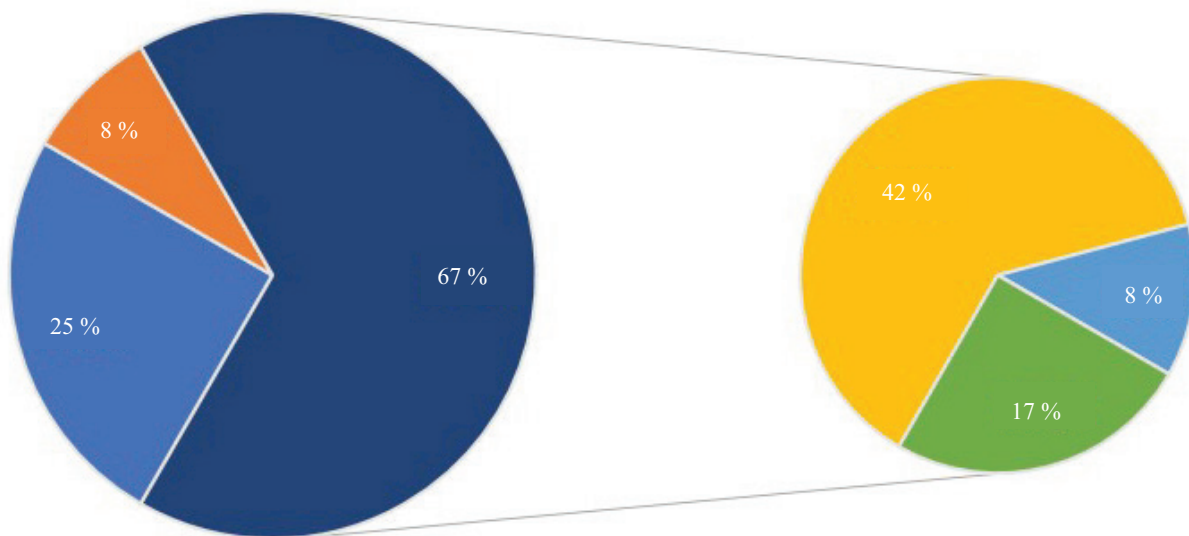


Рис. 9. Зависимость длительности испытаний от влажности и прочности древесины: испытания на скалывание вдоль волокон (a); испытания на сжатие поперек волокон (b)
Fig. 9. Dependence of test duration on moisture content and wood strength: shear tests along the fibres (a); compression tests across the fibres (b)



Главная диаграмма / Main diagram:

- Разрушение по древесине / Failure in wood
- Разрушение по древесине и клеевому соединению «древесина – древесина»
Failure in wood and in the adhesive joint “wood – wood”
- Разрушение по древесине и клеевому соединению «древесина – сталь»
Failure in wood and in the adhesive joint “wood – steel”

Вторичная диаграмма (относится к разрушению по древесине и клеевому соединению «древесина – сталь»):
Secondary diagram (refers to failure in wood and adhesive joint “wood – steel”):

- Превагирует разрушение по древесине / Failure in wood prevails
- 50 % разрушение по древесине, 50 % — по клеевому соединению
50 % failure in wood, 50 % in the adhesive joint
- Превагирует разрушение по клеевому соединению
Failure in the adhesive joint prevails

Рис. 10. Визуализация статистического распределения мест локализации разрушений при статических испытаниях вдоль волокон
Fig. 10. Visualization of the statistical distribution of failure locations during static tests along the fibres

Табл. 2. Пределы выносливости образцов. Испытания вдоль волокон

Table 2. Fatigue limits of samples. Tests along the fibres

Вероятность того, что указанный процент образцов не разрушится, % The probability that a given percentage of specimens will not fail, %	Предел выносливости (усталости) по максимальным напряжениям цикла, МПа Endurance (fatigue) limit for maximum cycle stresses, MPa			
	При скалывании вдоль волокон When chipping along the fibres	При сжатии поперек волокон When compressed across the fibres	При изгибе / When bending	
	$R = 0,2$		$R = 0,2$	$R = -1$
95	1,05	1,49	13,19	8,14
90	1,40	1,51	14,84	8,69
80	1,80	1,56	17,31	9,78

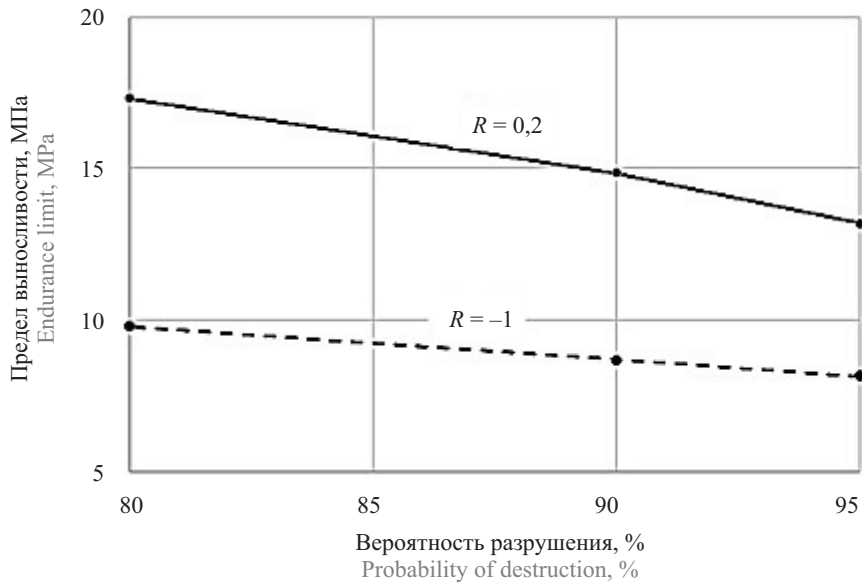


Рис. 11. Зависимость пределов выносливости при циклическом изгибе от коэффициента асимметрии цикла

Fig. 11. Dependence of the fatigue limits under cyclic bending on the cycle asymmetry coefficient



Рис. 12. Типичное разрушение образца при испытаниях на статический изгиб при коэффициенте асимметрии $R = 0,2$

Fig. 12. Typical failure of a specimen during static bending tests with an asymmetry coefficient $R = 0.2$

риала. Для сравнения — для металлов и сплавов эта величина в среднем составляет 1,42 [19].

На рис. 12 представлен образец, разрушившийся в испытаниях на статический изгиб при коэффициенте асимметрии $R = 0,2$.

В работе было проведено определение остаточной статической прочности во всех испытаниях (табл. 3). Сравнение статической прочности образцов, не разрушившихся в усталостных испытаниях,

и первичной выборки образцов, испытанных статически для установления предела прочности, показало, что образцы, не разрушившиеся в циклических испытаниях и после этого статически нагруженные до разрушения, имеют существенно больший разброс прочности (кроме образцов, прошедших циклические испытания с коэффициентом асимметрии $R = -1$). Для анализа применен критерий Стьюдента для несвязных непарных выборок с первичной про-

Табл. 3. Остаточная прочность образцов
Table 3. Residual strength of specimens

Вид испытания Test type	Предел прочности, МПа / Limit strength, MPa							
	Испытания на скалывание вдоль волокон When chipping along the fibres		Испытания на сжатие поперек волокон When compressed across the fibres		Испытания на изгиб / When bending			
					R = 0,2		R = -1	
Статистический параметр Statistical parameter	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens	Первичные измерения прочности Primary strength measurements	Остаточная прочность образцов Residual strength of specimens
Среднее значение, МПа Average value, MPa	5,23	5,72	2,46	2,58	33,00	32,14	32,44	24,6
Среднеквадратическое отклонение, МПа Standard deviation, MPa	0,48	0,75	0,25	0,45	3,50	5,41	7,85	5,08
Коэффициент вариации, % Variation coefficient, %	9,09	13,00	10,16	17,56	10,80	16,85	24,20	20,67
$t_{эм} / t_{ем}$	1,774		0,115		0,395		1,842	
$t_{кр} / t_{ср}$	2,110		2,145		1,740		1,740	

веркой выборок на нормальность распределения согласно ГОСТ Р ИСО 5479–2002¹³.

В табл. 3 указаны эмпирические $t_{эм}$ и критерияльные значения $t_{кр}$ критерия Стьюдента на уровне значимости 0,05 для двустороннего теста.

Считается, что на принятом уровне значимости при соблюдении условия $t_{эм} \geq t_{кр}$ разница средних значений выборок доказана. В проведенном исследовании этому условию удовлетворяет только выборка образцов, испытанных на циклический изгиб с коэффициентом асимметрии $R = -1$. Следовательно, только при испытании для этого случая можно считать статистически доказанным влияние циклических испытаний на остаточную прочность.

Для оценки влияния влажности на прочность для всех статических экспериментов проводился однофакторный дисперсионный анализ, который показал, что для клееной древесины доверительная вероятность, доказывающая влияние влажности (фактор) на прочность (отклик), составляет не менее 73 %. Средний коэффициент эластичности (величина, пока-

¹³ ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.

зывающая в процентах, насколько уменьшится прочность при увеличении влажности на 1 %) составляет –0,4 %. Это хорошо коррелируется с данными работы [20] о характере влияния влажности на прочностные характеристики древесины при различных видах приложения статической нагрузки: при изгибе, сжатии перпендикулярно и параллельно волокнам с увеличением влажности уменьшаются характеристики прочности древесины. Эти же зависимости характерны и для клееной древесины. Следовательно, весьма актуальны вопросы влагостойкости клееной древесины для изготовления элементов мостовых конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическая обработка экспериментальных результатов позволила выявить несколько специфических моментов, касающихся прочностных характеристик клееной древесины:

1. Предел выносливости при циклическом изгибе до 10 раз выше, чем предел выносливости при циклическом скалывании и сжатии. Это существенно выше, чем для других строительных материалов.

2. При определении остаточной прочности образцов только испытания на циклический изгиб с коэффициентом асимметрии $R = -1$ повлияли на оста-

точную прочность с доверительной вероятностью 95 %. При этом именно эти образцы показали снижение разброса свойств при установлении остаточной прочности. Во всех остальных испытаниях образцы, не разрушившиеся в циклических испытаниях и после этого статически нагруженные до разрушения, имеют существенно больший разброс прочности, что требует дополнительных исследований.

3. Статические испытания показали практически равномерную линейную работу клееных образцов, без скачков и выбросов значений при испытаниях на сжатие поперек волокон и менее равномерную — при испытаниях на скалывание вдоль волокон. Исследование разрушений выявило, что основная их часть при испытаниях на скалывание вдоль воло-

кон приходится на древесину и клеевое соединение «древесина – сталь» с преобладающим разрушением по древесине. С учетом того, что разрушение клеевого соединения происходит по древесине, можно сделать вывод о надежности клеевых соединений.

4. Исследование позволило определить средний коэффициент эластичности (величину, показывающую в процентах, насколько уменьшится прочность при увеличении влажности на 1 %). Она составила –0,4 %. Следовательно, для мостовых конструкций вопросы влагостойкости клееной древесины остаются актуальными.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение выборки исследуемых образцов и условий испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стуков В.П. Развитие деревянных мостов и их применение в условиях Севера // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 316–321. EDN DNPGEN.

2. Соколов А.Ю. Обзор зарубежной и отечественной историографии изучения средневековых деревянных мостов // Актуальная археология 7 : мат. Междунар. науч. конф. молодых ученых. 2024. С. 399–401. EDN XVQPKE.

3. Подъяпольская М.А., Вербицкий И.О., Вербицкая Е.В. Деревянные мосты. Мостостроение с использованием древесины в прошлом и сейчас // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 168–170. EDN QVUMAT.

4. Мищенко Д.С. Обзор деревянного мостостроения в России // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений : сб. науч. тр. 4-й Всеросс. науч.-практ. конф. 2022. С. 363–366. EDN GGUIXY.

5. Погорельцев А.А., Турковский С.Б. Особенности применения клееных деревянных конструкций в сейсмических районах // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 2 (301). С. 31–38. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.2.31.38. EDN YHQJAE.

6. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Стоянов В.О. Опыт эксплуатации большепролетных клееных деревянных конструкций с узлами системы ЦНИИСК // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 6 (305). С. 61–68. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.61.68. EDN EEXUNC.

7. Погорельцев А.А., Турковский С.Б. Линзообразные фермы из клееной древесины: особенности конструкций, испытания, расчет и применение // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 2 (295). С. 62–72. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.2.62.72. EDN RMZBNQ.

8. Масалов А.В., Кабанов В.А., Масалов Н.А. Сопротивление разрушению изгибаемых элементов из клееной древесины // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2–3. С. 229–232. EDN RSFKNL.

9. Уткин В.А. Совершенствование конструкций пролетных строений автодорожных мостов из клееной древесины : дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2009. 233 с. EDN QFETPZ.

10. Кобзев П.Н. Совершенствование конструкции и методики расчета многоребристого пролетного строения моста из клееной древесины с учетом совместной работы перекрестной деревоплиты и балок : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2006. 165 с.

11. Mahnert K.C., Hundhausen U. A review on the protection of timber bridges // Wood Material Science & Engineering. 2018. Vol. 13. Issue 3. Pp. 152–158. DOI: 10.1080/17480272.2017.1403955

12. Fiore A., Liuzzi M.A., Greco R. Some shape, durability and structural strategies at the conceptual design stage to improve the service life of a timber bridge for pedestrians // Applied Sciences. 2023. Vol. 10. Issue 6. P. 2023. DOI: 10.3390/app10062023

13. Hawryszkow P., Biliszczyk J. Vibration serviceability of footbridges made of the sustainable and eco structural material: Glued-laminated wood // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 4. P. 1529. DOI: 10.3390/ma15041529

14. Bergenudd J., Battini J.M., Crocetti R. Dynamic analysis of a pedestrian timber truss bridge at three construction stages // Structures. 2024. Vol. 59. P. 105763. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105763

15. Toyoda A., Honda H., Kato S. Static and dynamic structural performance of modern timber bridges // Journal of JSCE. 2020. Vol. 8. Issue 1. Pp. 26–34. DOI: 10.2208/journalofjsce.8.1_26

16. Garcia-Dieguez M., Racic V., Zapico-Valle J.L. Complete statistical approach to modelling vari-

able pedestrian forces induced on rigid surfaces // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 159. P. 107800. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107800

17. Song Z. Discussion on Human-induced Vibration of Glulam Pedestrian Arch Bridge // Academic Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 13. Issue 1. Pp. 181–184. DOI: 10.54097/f7kw8d13

18. Tazarv M., Carnahan Z., Wehbe N. Glulam timber bridges for local roads // Engineering Structures. 2019. Vol. 188. Pp. 11–23. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.012

19. Cerda F.C., Goulas C., Sabirov I., Papaefthymiou S., Monsalve A., Petrov R.H. Microstructure, Texture and Mechanical Properties in a Low Carbon Steel after Ultra-fast Heating // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 672. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.056

20. Ermakov V., Stepanova E. Moisture content and its influence on glued timber structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052015. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052015

Поступила в редакцию 29 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 января 2025 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Николаевич Шувалов — кандидат технических наук, доцент кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 737861, Scopus: 7005121558, ResearcherID: MBW-0293-2025, ORCID: 0009-0007-0289-7412; ashuvalov@mgsu.ru;

Олег Александрович Корнев — заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Владимир Анатольевич Какуша — заведующий лабораторией испытаний строительных материалов, изделий и конструкций Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 877806, Scopus: 57204878011, ResearcherID: AER-2849-2022, ORCID: 0000-0001-6524-1313; kakushava@yandex.ru;

Юрий Алексеевич Жидков — инженер лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1169277, ResearcherID: HNC-1653-2022, ORCID: 0000-0001-9283-7702; zhidkovyua@gmail.com;

Анна Владимировна Корнилова — доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 6569-6240, Scopus: 7004499009, ResearcherID: U-3353-2017, ORCID: 0000-0001-5569-9320; kornilovaav@mgsu.ru;

Валентин Алексеевич Ермаков — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; ermakov@mgsu.ru;

Дмитрий Егорович Капустин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru;

Максим Владимирович Федоров — заведующий лабораторией натурных испытаний Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 3288-5373, Scopus: 58805651700, ResearcherID: KGL-6252-2024, ORCID: 0009-0009-9041-2634; FedorovMV@mgsu.ru;

Алексей Вячеславович Насоновский — главный инженер проекта, Проектный отдел искусственных сооружений; **Сооружения инженерно-транспортной инфраструктуры (СИТИ);** 190013, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Семеновский, пер. Подъездной, д. 1, литера А, помещ. 1Н/6Н; aleksey.nasonovskiy@siti.spb.ru.

Вклад авторов:

Шувалов А.Н. — научное редактирование текста.

Корнев О.А. — разработка программы исследований и испытаний.

Какуша В.А. — участие в разработке программы и методики эксперимента, контроль выполнения всех этапов эксперимента, анализ полученных результатов отдельных испытаний.

Жидков Ю.А. — проведение исследования, анализ результатов исследования.

Корнилова А.В. — обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Ермаков В.А. — обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Капустин Д.Е. — проведение экспериментальных исследований.

Федоров М.В. — проведение экспериментальных исследований.

Насоновский А.В. — разработка программы исследований и испытаний, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Stukov V.P. Development of timber bridges and their use in north situations. *Regional aspects of development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastres at the beginning of the III millennium : proceedings of the International scientific and practical conference*. 2019; 316-321. EDN DNPGEH. (rus.).
2. Sokolov A.Yu. Review of foreign and domestic historiography of the study of medieval wooden bridges. *Actual archeology 7 : materials of the international scientific conference of young scientists*. 2024; 399-401. EDN XVQPKE. (rus.).
3. Pod'yapol'skaya M. A., Verbitskiy I.O., Verbitskaya E.V. Bridge construction using wood in the past and now. *Polzunovsky almanac*. 2022; 1:168-170. EDN QVUMAT. (rus.).
4. Mishchenko D.S. Review of wooden bridge construction in Russia. *Innovative methods of designing building structures of buildings and structures : collection of scientific papers of the 4th All-Russian scientific and practical conference*. 2022; 363-366. EDN GGUIXY. (rus.).
5. Pogoreltsev A.A., Turkovsky S.B. Features of application of glulam structures in seismic areas. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2022; 2(301):31-38. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.2.31.38. EDN YHQJAE. (rus.).
6. Turkovskiy S.B., Pogoreltsev A.A., Stoyanov V.O. Experience in the operation of large-span laminated timber structures with TSNIISK system nodes. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2022; 6(305):61-68. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.61.68. EDN EEXUNC. (rus.).
7. Pogoreltsev A.A., Turkovskii S.B. Glued wood lenticular trusses design features, testing, structural analysis and application. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2021; 2(295):62-72. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.2.62.72. EDN RMZBNQ. (rus.).
8. Masalov A.V., Kabanov V.A., Masalov N.A. Fracture toughness of bended elements of glued laminated timber. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2012; 2-3:229-232. EDN RSFKNL. (rus.).
9. Utkin V.A. *Improvement of the structures of superstructures of road bridges made of glued timber : thesis of the degree of doctor of technical sciences*. Omsk, 2009; 233. EDN QFETPZ. (rus.).
10. Kobzev P.N. *Improving the design and calculation methodology of a multi-ribbed span structure of a bridge made of glued laminated timber, taking into account the joint work of a cross-timber slab and beams : thesis of candidate of technical sciences*. Omsk, 2006; 165. (rus.).
11. Mahnert K.C., Hundhausen U. A review on the protection of timber bridges. *Wood Material Science & Engineering*. 2018; 13(3):152-158. DOI: 10.1080/17480272.2017.1403955
12. Fiore A., Liuzzi M.A., Greco R. Some shape, durability and structural strategies at the conceptual design stage to improve the service life of a timber bridge for pedestrians. *Applied Sciences*. 2023; 10(6):2023. DOI: 10.3390/app10062023
13. Hawryszkow P., Biliszczyk J. Vibration serviceability of footbridges made of the sustainable and eco structural material: Glued-laminated wood. *Materials*. 2022; 15(4):1529. DOI: 10.3390/ma15041529
14. Bergenudd J., Battini J.M., Crocetti R. Dynamic analysis of a pedestrian timber truss bridge at three construction stages. *Structures*. 2024; 59:105763. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105763
15. Toyoda A., Honda H., Kato S. Static and dynamic structural performance of modern timber bridges. *Journal of JSCE*. 2020; 8(1):26-34. DOI: 10.2208/journal-ofjsce.8.1_26
16. Garcia-Dieguez M., Racic V., Zapico-Valle J.L. Complete statistical approach to modelling variable pedestrian forces induced on rigid surfaces. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021; 159:107800. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107800
17. Song Z. Discussion on Human-induced Vibration of Glulam Pedestrian Arch Bridge. *Academic Journal of Science and Technology*. 2024; 13(1):181-184. DOI: 10.54097/f7kw8d13

18. Tazarv M., Carnahan Z., Wehbe N. Glulam timber bridges for local roads. *Engineering Structures*. 2019; 188:11-23. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.012
19. Cerda F.C., Goulas C., Sabirov I., Papaefthymiou S., Monsalve A., Petrov R.H. Microstructure, Texture and Mechanical Properties in a Low Carbon Steel after Ultrafast Heating. *Materials Science and Engineering: A*. 2016; 672:108-120. DOI: 10.1016/j.msea.2016.06.056
20. Ermakov V., Stepanova E. Moisture content and its influence on glued timber structures. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052015. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052015

Received November 29, 2024.

Adopted in revised form on January 16, 2025.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S : **Aleksandr N. Shuvalov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 737861, Scopus: 7005121558, ResearcherID: MBW-0293-2025, ORCID: 0009-0007-0289-7412; ashuvalov@mgsu.ru;

Oleg A. Kornev — Deputy Director of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Vladimir A. Kakusha — Head of the Laboratory for Testing Construction Materials, Products and Structures of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 877806, Scopus: 57204878011, ResearcherID: AER-2849-2022, ORCID: 0000-0001-6524-1313; kakushava@yandex.ru;

Yuri A. Zhidkov — engineer of the laboratory for testing building materials, products and structures of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1169277, ResearcherID: HHC-1653-2022, ORCID: 0000-0001-9283-7702; zhidkovyua@gmail.com;

Anna V. Kornilova — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 6569-6240, Scopus: 7004499009, ResearcherID: U-3353-2017, ORCID: 0000-0001-5569-9320; kornilovaav@mgsu.ru;

Valentin A. Ermakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; ermakov@mgsu.ru;

Dmitrii E. Kapustin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru;

Maxim V. Fedorov — Head of the Laboratory of Field Testing at the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 3288-5373, Scopus: 58805651700, ResearcherID: KGL-6252-2024, ORCID: 0009-0009-9041-2634; FedorovMV@mgsu.ru;

Aleksey V. Nasonovskiy — Chief Project Engineer, Design Department of Artificial Structures; **Engineering and Transport Infrastructure Structures**; room H/6H, litera A, 1, Podjezdnoy per., St. Petersburg, 190013, Russian Federation; aleksey.nasonovskiy@siti.spb.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr N. Shuvalov — scientific text editing.

Oleg A. Kornev — development of a research and testing program.

Vladimir A. Kakusha — development of the program and methodology of the experiment, control of the experiment, analysis of the results.

Yuri A. Zhidkov — research and analysis of the results.

Anna V. Kornilova — material processing, article writing, scientific text editing.

Valentin A. Ermakov — material processing, article writing, scientific text editing.

Dmitrii E. Kapustin — research.

Maxim V. Fedorov — research.

Aleksey V. Nasonovskiy — development of a research and testing program, scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interests.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.335

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.409-418

Исследование активности отходов тепловых электростанций с позиции применения в составе минеральных вяжущих

Ирина Юрьевна Маркова, Маргарита Андреевна Степаненко,
Валерия Валерьевна Строкова, Никита Олегович Лукьяненко

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для эффективного использования отходов в составе минеральных вяжущих и получения заданных характеристик конечных материалов на их основе необходимо учитывать одну из наиболее важных характеристик сырьевого компонента — активность. Выполнен анализ активности зол-уноса (ЗУ) различного состава с применением физико-химических методов, позволяющих определить возможность их использования в составе вяжущих систем на базе цемента. Получение минеральных вяжущих с применением отходов различных производств требует особого внимания ввиду специфики их получения, хранения и изменения свойств под воздействием внешних факторов. Комплексный подход при определении активности таких материалов позволит установить характер и механизмы взаимодействия ЗУ с компонентами вяжущего.

Материалы и методы. Проведен анализ активности отходов тепловых электростанций (ТЭС) в виде ЗУ разного состава: основной ЗУ Назаровской ТЭС; кислой ЗУ Рефтинской ГРЭС. Для анализа активности использован комплекс следующих методов: содержание свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) ускоренным методом (ГОСТ 25818–2017); тест Фраттини (EN 196-5:2011); метод Чапеля (NF P18-513); оценка теплоты гидратации методом дифференциальной калориметрии (авторская методика).

Результаты. На основании комплексной оценки активности отходов ТЭС установлено, что оба они являются активными. В свою очередь, основная ЗУ Назаровской ТЭС обладает одновременно вяжущими свойствами и в значительной степени пуццолановой активностью, а кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС — лишь пуццолановой активностью.

Выводы. Ввиду своей активности ЗУ могут быть использованы как вспомогательные компоненты в составе цементных композиций, так и взамен части цемента при рационально подобранном количестве компонентов. Для установления характера взаимодействия, а также скорости и интенсивности протекания реакций в процессе структурообразования цементной матрицы в присутствии ЗУ необходим комплексный подход с применением физико-химических методов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральные вяжущие, зола-уноса, цементные системы, активность, кинетика тепловыделения

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00796 (URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00796/>) с использованием оборудования Центра высоких технологий на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маркова И.Ю., Степаненко М.А., Строкова В.В., Лукьяненко Н.О. Исследование активности отходов тепловых электростанций с позиции применения в составе минеральных вяжущих // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 409–418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.409-418

Автор, ответственный за переписку: Ирина Юрьевна Маркова, irishka-31.90@mail.ru.

Study of the activity of thermal power plant waste from the point of application in mineral binders

Irina Yu. Markova, Margarita A. Stepanenko, Valeria V. Stroкова,
Nikita O. Lukyanenko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)

ABSTRACT

Introduction. For the efficient use of waste in mineral binders and obtaining the specified characteristics of the final materials based on them, it is necessary to take into account one of the most important characteristics of the raw material component — activity. The analysis of the activity of fly ash of different composition using various physicochemical methods, allowing to determine the possibility of their use in cement-based binder systems, was carried out. Obtaining mineral binders using waste from various industries requires special attention due to the specifics of their production, storage and change in properties under the influence of external factors. A comprehensive approach in determining the activity of such materials will allow us to establish the nature and mechanisms of interaction of fly ash with binder components.

Materials and methods. The paper analyzes the activity of thermal power plant waste in the form of fly ash of various compositions: basic fly ash of the Nazarovskaya TPP; acid fly ash of the Reftinskaya SDPP. The following set of methods was

used to analyze the activity: accelerated CaO content (GOST 25818–2017); Frattini test (EN 196-5:2011); Chapelle method (NF P18-513); assessment of the heat of hydration by differential calorimetry (proprietary technique).

Results. Based on a comprehensive assessment of the activity of the waste from the thermal power plant, it was established that both of them are active. In turn, the main fly ash from the Nazarovskaya TPP has both binding properties and, to a much lesser extent, pozzolanic activity, while the acidic fly ash from the Reftinskaya SDPP has only pozzolanic activity.

Conclusions. Due to its activity, fly ash can be used as auxiliary components in cement compositions, as well as to replace part of the cement with a rationally selected amount of components. To establish the nature of the interaction, as well as the speed and intensity of reactions in the process of structure formation of the cement matrix in the presence of fly ash, a comprehensive approach using physicochemical methods is necessary.

KEYWORDS: mineral binders, fly ash, cement systems, activity, heat release kinetics

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-19-00796 (URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00796/>) using the equipment of the High Technology Centre at BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Markova I.Yu., Stepanenko M.A., Strokova V.V., Lukyanenko N.O. Study of the activity of thermal power plant waste from the point of application in mineral binders. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):409-418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.409-418 (rus.).

Corresponding author: Irina Yu. Markova, irishka-31.90@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительная отрасль является крупнейшим потребителем минеральных сырьевых ресурсов. Объемы производства минеральных вяжущих, получаемых из высококачественного дорогостоящего природного сырья, ежегодно возрастают. Лидирующую позицию среди всех видов вяжущих веществ занимает цемент, так как используется практически во всех областях строительства. Согласно имеющимся данным производство бетонов на основе цемента составляет более 10 млрд м³ в год [1]. Снижение затрат на получение цементного вяжущего возможно за счет использования минеральных компонентов, эквивалентных по своей активности применяемому сырью. Ввиду больших скоплений и, как следствие, необходимости утилизации или повторного применения, интерес представляют отходы в виде золы-уноса (ЗУ) тепловых электростанций (ТЭС), полученные при сжигании различных видов углей. Кроме того, актуальность использования указанных отходов определена реализацией ряда стратегических задач строительной отрасли в целом, дорожно-строительной отрасли в частности, а также энергетической отрасли. Однако этот вид сырья характеризуется непостоянством свойств, что обусловлено влиянием совокупности следующих факторов: состав сжигаемого угля; технология сжигания; технология удаления; условия хранения.

Опыт применения ЗУ в составе цементных систем имеет практически вековую историю, но исследования в этом направлении активно продолжаются [2–6]. На сегодняшний день существует несколько классификаций этих материалов по их активности [7–9], отмечается широкое разнообразие композиций на основе цементных систем с их применением [10–14], разработаны рекомендации по их использованию [7].

В нашей стране применение ЗУ в строительной отрасли регламентируется следующими нормативными документами: ГОСТ Р 56196–2014 «Добавки активные минеральные для цементов. Общие тех-

нические условия»; ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»; ГОСТ Р 70196–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия». Несмотря на богатый опыт изучения отходов ТЭС и сформированную общую методологию их практического применения, использование зол в каждом конкретном случае требует индивидуального подхода с учетом особенностей получения конечного продукта и его заданных свойств.

Форсайт-анализ различных источников относительно определения свойств отходов топливно-энергетических предприятий в виде ЗУ показал, что наиболее значимым среди прочих является их активность. На сегодняшний день известно 9 методов определения активности, регламентируемых как отечественной, так и зарубежной нормативной документацией, а также авторских [7, 15–21]. Все методы условно можно разделить на две основные группы: физико-механические (косвенные) и физико-химические (прямые). Часто применения одного из методов бывает недостаточно в связи с малой информативностью, тогда как комплексный подход позволяет произвести многокритериальную оценку ЗУ в качестве активных компонентов в составе минеральных вяжущих на основе цемента. Так, например, анализ активности ЗУ с применением комплекса физико-механических методов позволил выявить согласованность полученных результатов, определить информативность используемых методик с учетом специфики применения вяжущей системы и их экспрессность. В этой связи представляется актуальным определение активности техногенного сырья в виде зольных отходов ТЭС с применением комплекса физико-химических методов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данного исследования объект изучения — алюмосиликатное техногенное сырье в виде

ЗУ различного состава. Зола-уноса Назаровской ТЭС является продуктом сжигания бурого угля Ирша-Бородинского месторождения с применением сухой технологии сжигания и удаления, обладает основным составом — содержание оксида кальция 37,8 %. Зола-уноса Рефтинской ГРЭС — продукт сжигания каменного угля Экибастузского месторождения с применением сухой технологии сжигания и удаления, обладает кислым составом — суммарное содержание оксида алюминия, кремния и железа более 90 %.

Для изучения активности ЗУ физико-химическими методами контрольным образцом служил портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н производства ЗАО «Белгородский цемент» (г. Белгород, Россия).

Химический и минеральный состав ЗУ представлен в табл. 1, 2. Определение количественного химического и минерально-фазового состава сырья производилось с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL 9900 WorkStation, рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA.

Активность ЗУ, как минеральной добавки для вяжущих систем на основе цемента, определялась различными физико-химическими методами.

Содержание свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) ускоренным методом проводили по стандартной методике, применяемой для ЗУ, в соответствии с ГОСТ 25818–2017.

Тест Фраттини, регламентируемый EN 196-5:2011, предполагает определение концентраций CaO^{2+} и OH^- , содержащихся в портландцементе и исследуемых минеральных добавках. Согласно методике 20 г пробы смешивали со 100 мл воды. Затем

закрытые емкости помещали в сушильный шкаф при 40 °С и хранили 8 сут. После чего растворы охлаждали при комнатной температуре и фильтровали. Далее в 50 мл отфильтрованного раствора добавляли 5 капель индикатора — метилового оранжевого и определяли общую щелочность с помощью 0,1 М HCl . Окончание титрования оценивали визуально в результате изменения цвета с желтого на оранжевый. После титрования в растворы добавляли NaOH для повышения pH среды до 12,5.

Содержание гидроксильной группы рассчитывали по формуле:

$$[\text{OH}^-] = \frac{1000 \cdot 0,1 \cdot V_3 \cdot f_2}{50},$$

где V_3 — объем раствора HCl , используемого для титрования, мл; f_2 — коэффициент 0,1 М раствора HCl .

Концентрацию оксида кальция определяли фотометрическим методом. В растворы добавляли 2–3 капли индикатора эриохром Т, затем помещали в кюветы спектрофотометра. После каждого измерения добавляли раствор этилендиамина тетрауксусной кислоты (ЭДТА) с шагом 0,5 мл, измеряя оптическую плотность при $\lambda = 522$ нм. Построив кривые на графике зависимости объема раствора ЭДТА от полученной оптической плотности, устанавливали пик, характеризующий максимальный объем ЭДТА, использованный для титрования.

Содержание оксида кальция рассчитывали по формуле:

$$[\text{CaO}] = 0,6 \cdot V_4 \cdot f_1,$$

где V_4 — объем раствора ЭДТА, используемого для титрования, мл; f_1 — коэффициент раствора ЭДТА.

Табл. 1. Химический состав ЗУ
Table 1. Chemical composition of fly ash

Производитель зола-уноса Fly ash producer	Содержание оксидов, мас. % / Oxide content, wt. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
Назаровская ТЭС Nazarovskaya TPP	31,55	8,84	37,80	8,99	4,40	6,31	0,76	0,20	3,15
Рефтинская ГРЭС Reftinskaya SDPP	60,20	30,92	1,28	3,35	0,15	0,58	0,53	0,75	1,90

Табл. 2. Минерально-фазовый состав ЗУ
Table 2. Mineral-phase composition of fly ash

Производитель зола-уноса Fly ash producer	Содержание компонентов, мас. % / Content of components, wt. %											
	RAS	Кварц Quartz	Мулит Mullit	Магнетит Magnetite	Альбит Albite	Ангидрит Anhydrite	Кальцит Calcite	Портландит Portlandite	Известь Lime	Периклаз Periclase	C ₃ A	C ₄ AF
Назаровская ТЭС Nazarovskaya TPP	49,24	7,61	–	1,56	–	7,02	0,69	3,47	4,09	0,85	21,35	4,12
Рефтинская ГРЭС Reftinskaya SDPP	62,6	6,3	25,6	1,8	3,9	–	–	–	–	–	–	–

Активной следует считать добавку, которая находится ниже кривой изотермы растворимости.

Определение концентраций Ca^{2+} и OH^- также производили методом поглощения добавкой извести из известкового раствора. Методика представляет собой упрощенный тест Фраттини и заключается в том, что 1 г добавки добавляли к 75 мл насыщенного раствора извести. Образцы выдерживали в сушильном шкафу при 40 °С в течение 1, 3, 7 и 28 сут для дальнейшего титрования. Расчет Ca^{2+} и OH^- выполняли по методике, указанной в описании теста Фраттини.

Снижение содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при взаимодействии с кремнистыми и алюмосиликатными материалами устанавливали методом Чапеля согласно стандарту NF P18-513. По методике 1 г минеральной добавки добавляли к 250 мл дистиллированной воды, содержащей 2 г извести. Смесь непрерывно перемешивали в течение 16 ч при 90 °С. После перемешивания в растворы добавляли по 250 мл сахарозы, перемешивали 10 мин и отбирали для титрования 25 мл каждой пробы.

Пуццолановую активность рассчитывали по формуле:

$$PA = 2 \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot \frac{74}{56} \cdot 1000,$$

где V_1 — объем HCl , используемый для титрования 25 мл контрольного раствора, мл; V_2 — объем HCl , используемый для титрования 25 мл раствора с добавкой, мл.

Оценку теплоты гидратации цемента с ЗУ проводили посредством дифференциального калориметра с изменяющейся температурой анероида.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ данных о содержании $\text{CaO}_{\text{св}}$ ускоренным методом позволил сделать следующие выводы (табл. 3). По содержанию $\text{CaO}_{\text{св}}$ рассматриваемые материалы существенно отличаются, так ЗУ Назаровской ТЭС содержит 14,05 % $\text{CaO}_{\text{св}}$, что в 7 раз превышает значения, нормируемые ГОСТ 25818–2017, тогда как кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС содержит лишь 0,075 % $\text{CaO}_{\text{св}}$. Таким образом, ЗУ Назаровской ТЭС характеризуется высокой активностью. При использовании ее в составе цементных систем следует контролировать сроки схватывания и твердения смесей, так как она может значительно ускорять процессы

структурообразования и приводить к саморазрушению в результате избыточного роста кристаллических структур.

Согласно данным теста Фраттини (рис. 1) с учетом состава исследуемых зол-уноса отмечается логичный результат — ЗУ Рефтинской ГРЭС проявляет пуццолановую активность в 8 и 15 сут за счет высокого содержания рентгеноаморфной фазы, состоящей преимущественно из кремнезема (SiO_2 60,20 %), в то время как цемент и ЗУ Назаровской ТЭС (SiO_2 31,55 %) находятся выше кривой растворимости, что свидетельствует о практическом отсутствии их пуццолановой активности.

По результатам проведенного анализа методом поглощения добавок в виде ЗУ извести из известкового раствора (табл. 4, рис. 2) установлено, что обе добавки обладают высокой способностью к поглощению в первые сутки. При этом наиболее высокой способностью к поглощению характеризуется кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС — суммарное значение концентрации поглощенных CaO^{2+} и OH^- более чем на 10 единиц превышает эти значения, характеризующие вяжущее без добавки (цемент) и основную ЗУ Назаровской ТЭС. В дальнейшем на 3-и и 7-и сут процесс поглощения извести золами-уноса характеризуется спадом. Так, по сравнению с цементом концентрация поглощенных CaO^{2+} и OH^- как у основной, так и у кислой золы на 3-и сут ниже в среднем на 50 %, а на 7-е сут — более чем на 60 %. На 28-е сут концентрация поглощенной извести свидетельствует о незначительном повышении показателя, характеризующего цемент по сравнению с 7 сут (практически на 3,5 ммоль/л), тогда как значения исследуемого показателя для добавок в виде ЗУ несколько снижаются (не более чем на 2 ммоль/л). Такой характер поглощения извести из раствора с течением времени закономерен для рассматриваемых ЗУ, учитывая их химический состав. Ввиду своей высокой основности ЗУ Назаровской ТЭС характеризуется относительно невысокой концентрацией поглощенной извести на начальном этапе эксперимента (1-е сут), а с течением времени значения исследуемого показателя плавно снижаются. В случае же с кислой золой, напротив, — на начальном этапе (1-е сут) происходит гораздо более активное поглощение извести, а затем уже на 3-и сут концентрация поглощенных CaO^{2+} и OH^- ниже по сравнению с основной ЗУ. Получен-

Табл. 3. Содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$ ускоренным методом

Table 3. The content of CaO_{sv} by the accelerated method

Производитель золы-уноса Fly ash producer	Содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$, % / The content of the f- CaO , %	
	Фактические значения Actual values	Норма по ГОСТ 25818–2017 The norm according to GOST 25818–2017
Назаровская ТЭС Nazarovskaya TPP	0,075	–
Рефтинская ГРЭС Refinskaya SDPP	14,050	2

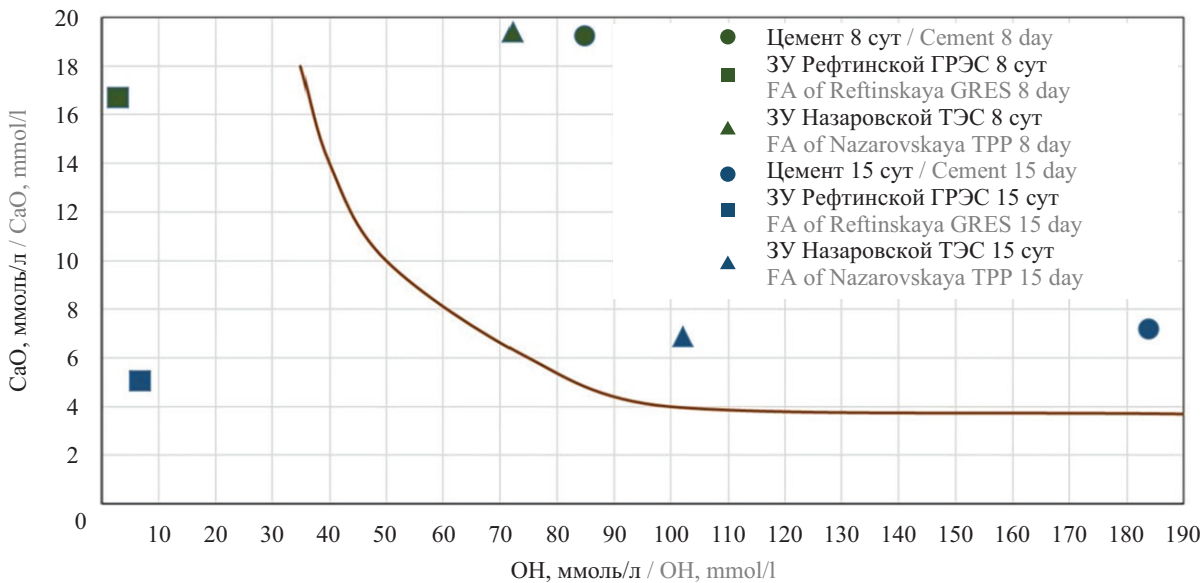


Рис. 1. Результаты теста Фраттини

Fig. 1. Results of the Frattini test

Табл. 4. Определение поглощенного Ca(OH)₂

Table 4. Determination of absorbed Ca(OH)₂

Добавка	Концентрация, ммоль/л / Concentration, mmol/l							
	1		3		7		28	
	ОН ⁻	CaO ²⁺	ОН ⁻	CaO ²⁺	ОН ⁻	CaO ²⁺	ОН ⁻	CaO ²⁺
Цемент / Cement	19,024	4,996	20,336	7,492	29,521	7,493	35,422	4,993
ЗУ Назаровской ТЭС FA of Nazarovskaya TPP	18,368	6,245	16,411	2,498	14,431	2,494	9,841	4,990
ЗУ Рефтинской ГРЭС FA of Reftinskaya SDPP	24,931	7,493	13,124	1,253	5,904	6,245	4,592	6,243

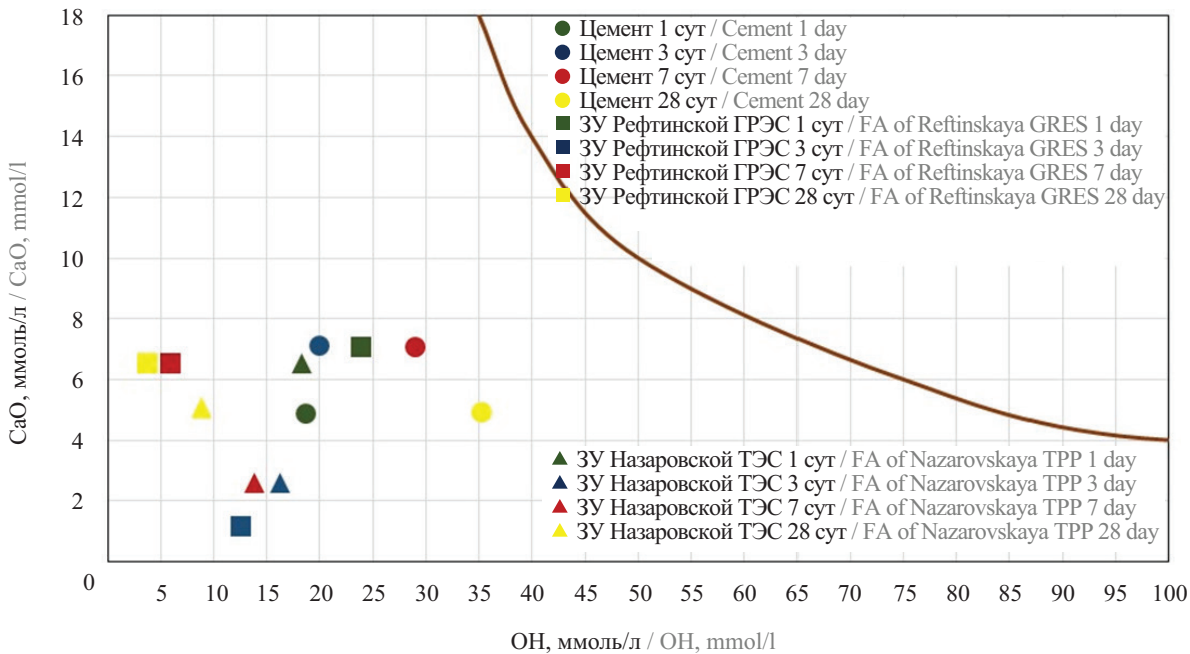


Рис. 2. Определение поглощенного Ca(OH)₂

Fig. 2. Determination of absorbed Ca(OH)₂

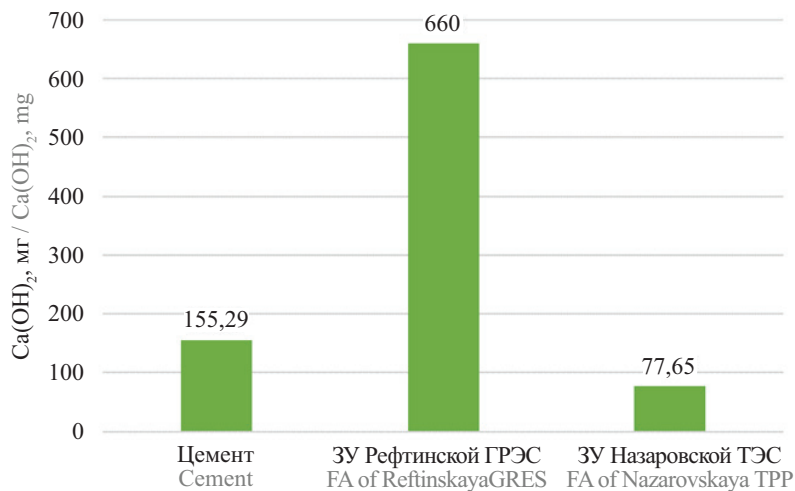


Рис. 3. Результаты пуццолановой активности по тесту Чапеля

Fig. 3. Results of pozzolan activity according to the Chapelle test

ные результаты согласуются с результатами других исследователей.

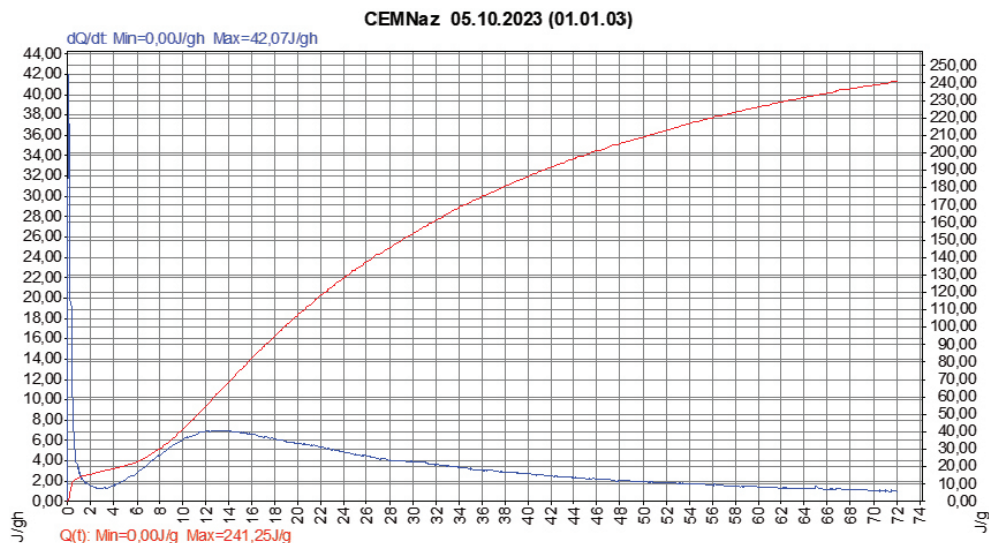
Учитывая специфику метода Чапеля, следует отметить, что применяемый в ходе эксперимента раствор сахарозы обладает способностью растворять алюминатную и ферритную фазу, оставляя силикаты и второстепенные фазы, что может существенно повысить поглощающую способность ЗУ. Так, в результате экспериментальных исследований установлено (рис. 3), что наибольшей активностью обладает кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС, количество поглощенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при изотермическом нагреве для которой в течение 16 ч составило 660 мг, что в 4 раза выше по сравнению с цементом и в 8,5 раз выше по сравнению с основной ЗУ Назаровской ТЭС. Такие значения объясняются тем, что суммарное содержание оксидов алюминия и железа для ЗУ Рефтинской ГРЭС составляет 34,27 %.

Анализ термокинетических кривых процессов гидратации цемента с ЗУ Назаровской ТЭС и Реф-

тинской ГРЭС при температуре 27 °С с длительностью измерений 3 сут показывает основные периоды твердения (рис. 4).

Цемент с ЗУ Назаровской ТЭС после взаимодействия с водой проявляет химическую реакцию (через 21 с), а через 7 мин 22 с фиксируется первый пик тепловыделения 42,07 Дж/г·ч с количеством выделившегося тепла 3,55 Дж/г, обусловленный происходящей гидратацией. Затем скорость тепловыделения снижается до 1,28 Дж/г·ч, что означает окончание первой стадии гидратации и происходит процесс набора прочности. Дальнейший подъем характеризуется ускоренной гидратацией последующим индукционным периодом. Максимальное количество выделившегося тепла наблюдали на 3-и сут — 240,68 Дж/г.

Цемент с ЗУ Рефтинской ГРЭС после взаимодействия с водой проявляет химическую реакцию (через 29 с), а через 7 мин 31 с, так же как у цемента с ЗУ Назаровской ТЭС, фиксируется первый пик тепло-



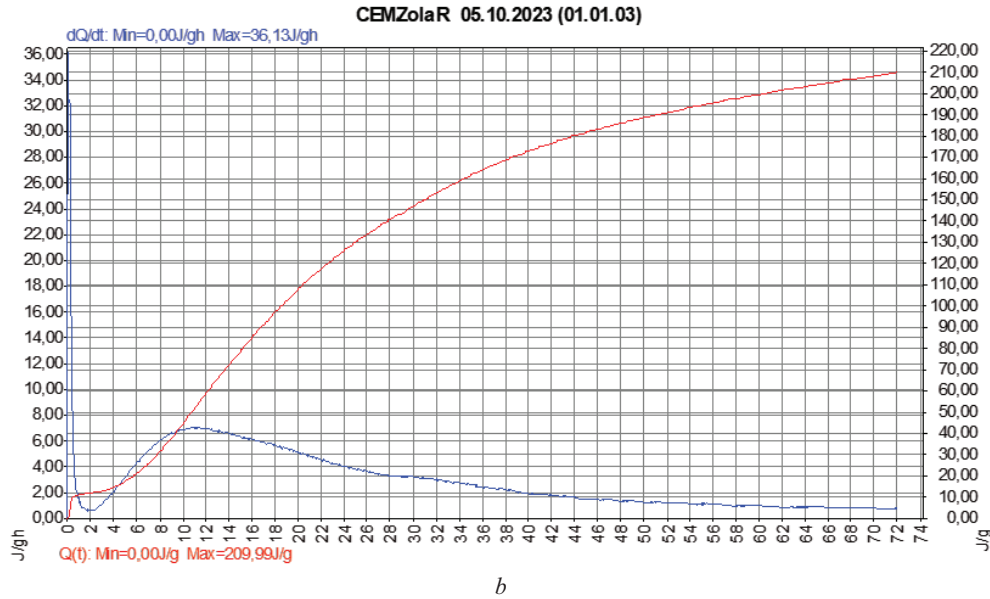


Рис. 4. Теплота гидратации цемента: *a* — с ЗУ Назаровской ТЭС; *b* — с ЗУ Рефтинской ГРЭС

Fig. 4. The heat of hydration of cement: *a* — with fly ash from the Nazarovskaya TPP; *b* — with fly ash from the Reftinskaya SDPP

выделения 36,13 Дж/г·ч с количеством выделившегося тепла 3,11 Дж/г. Затем скорость тепловыделения снижается до 0,56 Дж/г·ч и наступает период схватывания и набор прочности. Также у смеси наблюдали ускоренный процесс гидратации с последующим индукционным периодом. Максимальное количество выделившегося тепла наблюдали на 3-и сут — 209,96 Дж/г.

Применение ЗУ Рефтинской ГРЭС взамен части цемента приводит к меньшему тепловыделению, чем с ЗУ Назаровской ТЭС, что объясняется отсутствием в ее минерально-фазовом составе клинкерных минералов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов экспериментальных исследований активности ЗУ различного состава с применением комплекса физико-химических методик показал, что каждая из применяемых в работе методик позволяет определить различные параметры и дает возможность предусмотреть характер и механизмы взаимодействия техногенного сырья с цементом. На основании комплексной оценки активности отходов ТЭС установлено, что оба они являются активными. В свою очередь, по данным теста Чапеля основная ЗУ Назаровской ТЭС обладает одновременно вяжущими свойствами и в значительно меньшей степени пуццолановой активностью, а кислая ЗУ Рефтинской ГРЭС — лишь пуццолановой активностью.

В виду своей активности ЗУ могут быть использованы как вспомогательные компоненты в составе цементных композиций, так и взамен части цемента при рационально подобранном количестве компонентов с учетом особенностей взаимодействия с продуктами гидратации цемента для обеспечения заданных прочностных характеристик.

Кроме того, по данным методики, регламентированной ГОСТ 25818–2017, содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$ у основной ЗУ Назаровской ТЭС в 7 раз превышает предельное значение нормы, что ограничивает ее применение в составе бетонов на основе цемента. Ее применение может повлиять на ускорение сроков твердения цемента и набор прочности. Об этом также свидетельствуют результаты анализа теплоты гидратации пробы цемента с содержанием этой ЗУ. Так, например, для дорожно-строительной отрасли это является весомым фактором, ограничивающим время осуществления технологических операций при устройстве функциональных слоев.

В заключение следует отметить, что для установления возможности и целесообразности применения ЗУ в составе цементных композитов достаточно применения методики, нормируемой отечественным стандартом, однако для определения характера взаимодействия, а также скорости и интенсивности протекания реакций в процессе структурообразования цементной матрицы в присутствии ЗУ необходим комплексный подход.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Володин В.В., Тараканов О.В., Низина Т.А., Кяшкин В.М., Балыков А.С. Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 8. С. 1317–1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP.
2. Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В. Применение золы ТЭС для получения высокопрочных бетонов и снижения расхода цемента // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 3–7. DOI: 10.31659/0005-9889-2022-610-2-3-7. EDN SLHTXZ.
3. Макаренко С.В., Хохлаков О.В., Хозин В.Г., Беляков А.Ю. Цементы низкой водопотребности — эффективные строительные материалы для утилизации золошлаковых смесей ТЭЦ // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10 (106). С. 524–532. EDN QSOEBO.
4. Истомина К.Р., Бургунтдинов А.М., Хусаинова К.А. Возможные технологии использования золы уноса // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2022. № 1. С. 36–44. DOI: 10.15593/24111678/2022.01.05. EDN FZTEOA.
5. Stroková V.V., Markova I.Y., Markov A.Y., Stepanenko M.A., Nerovnaya S.V., Bondarenko D.O. et al. Properties of a Composite Cement Binder Using Fuel Ashes // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 909 KEM. Pp. 184–190. DOI: 10.4028/p-tm4y4j. EDN DZHXTS.
6. Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А. Прогнозирование прочности портландцемента в присутствии топливных зол // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33. EDN HPFLJZ.
7. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог: обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М. : Союздорнии, 2003. 58 с. EDN QNQXJH.
8. Королев Е.В. Нанотехнология в строительном материаловедении. Анализ состояния и достижений. Пути развития // Строительные материалы. 2014. № 11. С. 47. EDN SYSIMT.
9. Галибина Е.А. Классификация пылевидных зол в зависимости от вещественного состава, обеспечивающего их рациональное направление использования для производства строительных материалов // Исследования по строительству. Строительная теплофизика. Долговечность конструкций. Талин, 1981.
10. Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Жерновский И.В. Особенности получения геополимерного газобетона на основе золы-уноса Новотроицкой ТЭЦ // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 113–117. EDN XXHXF.
11. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 239. P. 117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888
12. Лам Т.В., Хунг Н.С., Зиен В.К., Чык Н.Ч., Булгаков Б.И., Баженова О.Ю. и др. Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 11–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21. EDN ZAHMDZ.
13. Баженов Ю.М., Воронин В.В., Алимов Л.А., Бахрах А.М., Ларсен О.А., Соловьев В.Н. и др. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1385–1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391. EDN YMEBXK.
14. Балабанов В.Б., Николаенко В.Л. Композитный материал в укатываемом бетоне // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12 (59). С. 119–123. EDN ONXUNB.
15. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтикен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 4 (22). С. 16–21. EDN NVYMZJ.
16. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М. : Высшая школа, 1973. 504 с.
17. Потапова Е.Н., Манушина А.С., Зырянов М.С., Урбанов А.В. Методы определения пуццолановой активности минеральных добавок // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 7–8 (222–223). С. 29–33. EDN XEFJRN.
18. Ferraz E. Pozzolanic activity of metakaolins by the French Standard of the modified Chapelle Test : a direct methodology // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2015. Pp. 289–298. DOI: 10.13168/agg.2015.0026
19. Dolenec S., Ducman V. Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, Frattini test and DTA/TG Analysis // Technical Gazette. 2018. Vol. 25. Issue 6. DOI: 10.17559/tv-2017-1203193229
20. Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.А., Гридчина А.А. Оценка активности минеральных добавок для композиционных цементов // Сухие строительные смеси. 2012. № 4. С. 29–32. EDN THYERN.
21. Donatello S., Tyrer M., Cheeseman C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity // Cement and Concrete Composites. 2010. Vol. 32. Issue 2. Pp. 121–127. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008

Поступила в редакцию 22 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 9 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Юрьевна Маркова** — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 671668, Scopus: 57216581692, ResearcherID: ABG-4964-2021, ORCID: 0000-0002-7569-1825; irishka-31.90@mail.ru;

Маргарита Андреевна Степаненко — инженер, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1037561, Scopus: 57216581139, ResearcherID: AAU-6977-2020, ORCID: 0000-0002-4130-5703; stepanenko.rita2017@yandex.ru;

Валерия Валерьевна Строчкова — доктор технических наук, профессор, директор, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com;

Никита Олегович Лукьяненко — аспирант; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1037561; niklu03@gmail.com.

Вклад авторов:

Маркова И.Ю. — идея, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Степаненко М.А. — участие в выполнении экспериментов, анализ и обработка полученных результатов, подготовка исходного текста, итоговые выводы.

Строчкова В.В. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Лукьяненко Н.О. — участие в выполнении экспериментов, сбор полученных данных, подготовка графического материала, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Volodin V.V., Tarakanov O.V., Nizina T.A., Kyashkin V.M., Balykov A.S. Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1317-1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP. (rus.).
2. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V. The use of thermal power plant ash to produce high-strength concrete and reduce cement consumption. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2022; 2(610):3-7. DOI: 10.31659/0005-9889-2022-610-2-3-7. EDN SLHTXZ. (rus.).
3. Makarenko S.V., Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Belyakov A.Yu. Low water demand cements are effective building materials for recycling ash and slag waste from thermal power plants. *Engineering journal of Don*. 2023; 10(106):524-532. EDN QSOEBO. (rus.).
4. Istomina K., Burgonutdinov A., Khusainova K. Possible technologies for using fly ash. Transport. Transport Facilities. *Ecology*. 2022; 1:36-44. DOI: 10.15593/24111678/2022.01.05. EDN FZTEOA. (rus.).
5. Strokov V.V., Markova I.Y., Markov A.Y., Stepanenko M.A., Nerovnaya S.V., Bondarenko D.O. et al. Properties of a Composite Cement Binder Using Fuel Ashes. *Key Engineering Materials*. 2022; 909 KEM:184-190. DOI: 10.4028/p-tm4y4j. EDN DZHXTC.
6. Markov A., Bezrodnykh A., Markova I., Strokov V., Dmitrieva T., Stepanenko M. Forecasting strength of Portland cement in the presence of fuel ashes. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020; 3:26-33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33. EDN HPFLJZ. (rus.).
7. Putlin E.I., Tsvetkov V.S. Use of fly ash and ash-slag mixtures in the construction of highways : a review of domestic and foreign experience in the use of waste from the combustion of solid fuel at thermal power plants. Moscow, Soyuzdornii, 2003; 58. EDN QNXXJH. (rus.).
8. Korolev E.V. Nanotechnology in construction materials science. Analysis of the state and achievements. Development paths. *Construction Materials*. 2014; 11:47. EDN SYSIMT. (rus.).
9. Galibina E.A. Classification of dust ash depending on the material composition, ensuring their rational use for the production of building materials. Research in construction. Construction thermal physics. *Durability of structures*. Talin, 1981. (rus.).

10. Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Zhernovsky I.V. Features of producing geopolymeric gas concrete on the basis of fly ash of Novotroitskaya TPS. *Construction Materials*. 2017; 1-2:113-117. EDN XXHXF. (rus.).
11. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2020; 239:117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888
12. Lam T.V., Hung N.X., Dien Vu.K., Chuc N.T., Bulgakov B.I., Bazhenova O.Yu. et al. Effect of water-binder ratio and complex organic-mineral additive on properties of concrete for marine hydrotechnical constructions. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 3:11-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21. EDN ZAHMDZ. (rus.).
13. Bazhenov Yu.M., Voronin V.V., Alimov L.A., Bakhrakh A.M., Larsen O.A., Solov'ev V. N. et al. High-quality self-compacting concrete with coal burning waste. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(12):(111):1385-1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391. EDN YMEBXK. (rus.).
14. Balabanov V., Nikolaenko V. Composite material in rolled concrete. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011; 12(59):119-123. EDN ONXUNB. (rus.).
15. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtiken P. Use of ashes and ash and slag waste in construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 4(22):16-21. EDN NVYMZJ. (rus.).
16. Butt Yu.M., Timashev V.V. *Practical training in chemical technology of binders*. Moscow, Higher School, 1973; 504. (rus.).
17. Potapova E.N., Manushina A.S., Zyryanov S.M., Urbanov A.V. Methods for determining pozzolanic activity of mineral additives. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2017; 7-8(222-223): 29-33. EDN XEFJRN. (rus.).
18. Ferraz E. Pozzolanic activity of metakaolins by the French Standard of the modified Chapelle Test : a direct methodology. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2015; 289-298. DOI: 10.13168/agg.2015.0026
19. Dolenec S., Ducman V. Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, Frattini test and DTA/TG Analysis. *Technical Gazette*. 2018; 25(6). DOI: 10.17559/tv-20171203193229
20. Shakhova L.D., Kuchero D.E., Aksyutin Yu.A., Gridchina A.A. Evaluation of the activity of mineral additives for the composite cements. *Dry Building Mixtures*. 2012; 4:29-32. EDN THYERN. (rus.).
21. Donatello S., Tyrer M., Cheeseman C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010; 32(2):121-127. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008

Received November 22, 2024.

Adopted in revised form on December 9, 2024.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S : **Irina Yu. Markova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Innovative Scientific, Educational and Experimental Industrial Center of Nanostructured Composite Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 671668, Scopus: 57216581692, ResearcherID: ABG-4964-2021, ORCID: 0000-0002-7569-1825; irishka-31.90@mail.ru;

Margarita A. Stepanenko — engineer, Innovative Scientific, Educational and Experimental Industrial Center of Nanostructured Composite Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1037561, Scopus: 57216581139, ResearcherID: AAU-6977-2020, ORCID: 0000-0002-4130-5703; stepanenko.rita2017@yandex.ru;

Valeria V. Strokov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director doctor of sciences (engineering), professor, director, Innovative Scientific, Educational and Experimental Industrial Center of Nanostructured Composite Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com;

Nikita O. Lukyanenko — postgraduate student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1037561; niklu03@gmail.com.

Contribution of the authors:

Irina Yu. Markova — idea, concept of the study, scientific editing of the text, final conclusions.

Margarita A. Stepanenko — participation in the experiments, analysis and processing of the obtained results, preparation of the original text, final conclusions.

Valeria V. Strokov — scientific supervision, concept of the study, revision of the text, final conclusions.

Nikita O. Lukyanenko — participation in the experiments, collection of the obtained data, preparation of graphic material, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.057

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.419-428

Оптимизация производства в условиях выпуска широкой номенклатуры изделий

Виталий Юрьевич Гуринович¹, Дмитрий Александрович Поздняков²,
Сергей Николаевич Леонович¹

¹ Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь;

² Республиканское унитарное предприятие «Институт жилища — Научно-исследовательский
и проектно-технологический институт стройиндустрии им. Атаева С.С.»
(Институт жилища — НИПТИС им. Атаева С.С.); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие индустриального жилищного строительства характеризуется ростом домов с индивидуальными архитектурными и конструктивно-планировочными решениями. Это является следствием роста номенклатуры изделий, повышения доли продукции с низкими параметрами тиражности и большим диапазоном колебаний трудоемкости. Отсутствие должного внимания к большому разбросу параметров изделий — результат неритмичности производства, простоев и неэффективного использования трудовых ресурсов. В таких условиях важно обеспечение комплектности производства изделий и соблюдение графиков поставки продукции на строительную площадку. Решение указанных задач реализуется управлением запасами готовой продукции или созданием ритмичного и непрерывного производства.

Материалы и методы. В соответствии с задачами исследования применялись методы анализа и синтеза, математической статистики, имитационного моделирования и экспертных оценок. Для оценки сложности изделий определена система критериев с учетом конструктивных решений и геометрических параметров изделий. На основании установленных критериев изделия классифицированы на категории, для которых определены индикаторы сложности и показатели трудоемкости. Данная классификация изделий легла в основу алгоритма оптимизации производства.

Результаты. Анализ номенклатуры изделий производственных программ предприятий зафиксировал колебания показателей трудоемкости производства в диапазоне 2,0–17,0 чел.-ч. Предпринятая попытка установить зависимость показателей трудоемкости от объема изделия показала отсутствие функциональной зависимости. На базе анализа распределения трудоемкости обоснована гипотеза о влиянии на показатели трудоемкости прежде всего конструктивных особенностей изделий.

Выводы. На основании полученных данных предложена система планирования раскладки изделий в формах и назначения ритма производства с учетом конструктивных решений изделий по индикаторам сложности, которые могут устанавливаться методом экспертных оценок. Для практической реализации предложенной системы оценок разработан алгоритм назначения оптимальных технологических параметров, который обеспечивает одновременно равновесную трудоемкость и оптимальную раскладку изделий в формах и тем самым ритмичность производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индустриальное домостроение, предприятия индустриального домостроения, сборные железобетонные конструкции, организация производства, номенклатура изделий, производственная мощность, производственная программа предприятий, оптимизация производства, алгоритм, трудоемкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гуринович В.Ю., Поздняков Д.А., Леонович С.Н. Оптимизация производства в условиях выпуска широкой номенклатуры изделий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 419–428. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.419-428

Автор, ответственный за переписку: Виталий Юрьевич Гуринович, Gurinovich@bntu.by.

Optimization of production under conditions of production of a wide range of products

Vitaliy Yu. Gurinovich¹, Dmitrii A. Pozdnyakov², Sergey N. Leonovich¹

¹ Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus;

² Republican Unitary Enterprise “Institute of Housing — Research and Design and Technological Institute of the Construction Industry named after Ataeva S.S.” (Institute of housing — NIPTIS named after Atayev S.S.); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The development of industrial housing construction is characterized by the growth of houses with individual architectural and structural-planning solutions. This is a consequence the growth of the product range, increase in the share of individual products with low circulation parameters and a wide range of fluctuations in labour intensity. Lack of proper attention to a large variation of product parameters is a consequence of non-rhythmic production, downtime and inefficient use labour resources. In such conditions it is important to ensure completeness of products production and compliance with delivery schedules products to the construction site. The solution of these tasks is realized by managing stocks of finished products or creating rhythmic and continuous production.

Materials and methods. In accordance with the research objectives, the methods of analysis and synthesis, mathematical statistics, simulation modelling and expert evaluations were applied. To assess the complexity of products, a system of criteria was established, taking into account the design solutions and geometric parameters of products. Based on the established criteria, the products are classified into categories, for which the complexity indicators and labour intensity indicators are determined. This classification products formed the basis of the production optimization algorithm.

Results. The analysis of the nomenclature of products of the production programmes of the enterprises has fixed the fluctuations of labour intensity indicators of production in the range of 2.0–17.0 man-hours. The attempt to establish the dependence of labour intensity indicators on the product volume showed the absence of functional dependence. On the basis of the analysis of labour intensity distribution the hypothesis about the influence on the labour intensity indicators, first of all, the design features of products were substantiated.

Conclusions. On the basis of the obtained data, a system of planning the layout of products in moulds and assigning the rhythm of production taking into account the design solutions of products according to the indicators of complexity, which can be established by the method of expert evaluations, is proposed. For practical implementation of the proposed evaluation system, an algorithm of optimal technological parameters assignment is developed, which provides simultaneously equilibrium labour intensity and optimal product layout in moulds, and thus rhythmicity of production.

KEYWORDS: industrial house-building, industrial house-building enterprises, prefabricated reinforced concrete structures, production organization, product range, production capacity, production programme of enterprises, production optimization, algorithm, labour intensity

FOR CITATION: Gurinovich V.Yu., Pozdnyakov D.A., Leonovich S.N. Optimization of production under conditions of production of a wide range of products. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):419-428. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.419-428 (rus.).

Corresponding author: Vitaliy Yu. Gurinovich, Gurinovich@bntu.by.

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурная выразительность и разнообразие конструктивно-планировочных решений домов в индустриальном исполнении — следствие расширения номенклатуры изделий в производственных программах предприятий, повышения доли индивидуальной продукции с низкими параметрами тиражности. При этом в работах [1–6] приводятся факты закономерности роста номенклатуры изделий и зависимости этого роста от архитектурной выразительности и гибкости конструктивно-планировочных решений домов.

Одной из ключевых задач планирования и управления производством широкой номенклатуры изделий является оптимизация организации комплектного выпуска продукции при рациональном использовании имеющихся ресурсов, в том числе запасов готовой продукции на складе [4]. Данная точка зрения просматривается в работах [7–10].

Известны два основных подхода оптимизации и повышения эффективности производства широкой номенклатуры изделий для гибкого реагирования на изменение спроса на продукцию и обеспечения непрерывности поставок изделий на строительные площадки: управление запасами готовой продукции и управление резервами времени в производственном цикле выпуска изделий.

Продуктивным направлением оптимизации служит создание резервов времени за счет обеспечения ритмичного производства и сокращения продолжительности производственного цикла [9, 10]. Данный

подход базируется на синхронизации продолжительности операций на отдельных переделах производственного цикла и равномерном распределении трудовых ресурсов. Это содействует минимальным запасам комплектующих материалов и готовой продукции на складе, позволяет снизить затраты на оборотные средства предприятий, сократить производственные площади для складирования изделий [11–16]. Приведенные факты обосновывают экономическую эффективность обеспечения непрерывной и комплектной поставки изделий на строительные площадки за счет достижения ритмичности производства.

Тем не менее в отечественной практике организации производства для обеспечения непрерывности поставки изделий на строительные площадки повсеместно практикуется подход управления запасами готовой продукции на складе. Для сравнения такой подход дает возможность улучшить экономические показатели предприятий, способствует ритмичной работе всего индустриального строительного комплекса и играет существенную роль в совершенствовании технологии индустриального домостроения, но при этом доля трудовых затрат на складирование изделий составляет (без учета формовочных цехов) около 7 % трудовых затрат производства, а доля капитальных вложений — 14 % [4].

В качестве основных сдерживающих факторов применения подходов, основанных на создании резервов времени, можно выделить сложность обеспечения ритмичности производства в условиях широкой и изменяющейся номенклатуры изде-

лий в производственных программах предприятий с большими колебаниями показателей трудоемкости. Кроме того, отсутствие должного внимания к данному подходу обусловлено установленным в нормативной документации¹ порядком назначения ритма производства в зависимости от типа, габаритов и объема изделий. При этом производственный ритм назначается по усредненным показателям и постоянным на всех технологических переделах. Такой грубый подход к планированию производства является простым, но не соответствует критериям эффективного производства в условиях широкой линейки конструктивных решений изделий [17–20]; приводит к неритмичности производства и, как следствие, образованию простоев на отдельных переделах производства.

Следует отметить, что планирование раскладки изделий в формах технологических линий непосредственно в производственных условиях осуществляется операторами линий или персоналом технического отдела предприятий, при этом эффективность схем раскладки зависит от квалификации и опыта работника. Это может стать причиной снижения эффективности производства и нерационального использования энергоресурсов в случае низкого показателя загрузки форм и неритмичности производства при неравномерности показателей трудоемкости для отдельных форм на технологической линии.

Таким образом, отсутствие должного внимания к большому разбросу параметров изделий в номенклатуре производственных программ предприятий на современном этапе развития индустриального домостроения и планированию раскладки изделий в формах технологических линий определяет актуальность исследований в данном направлении. При этом научное обоснование зависимости ритма производства прежде всего от конструктивных решений изделий — важная задача в организации ритмичного и бесперебойного производства.

На основании вышесказанного приоритетной задачей оптимизации производства за счет обеспечения ритмичности и непрерывности выпуска продукции является определение критериев оценки сложности конструктивных решений разнотипных изделий и разработка на этой основе алгоритма достижения равномерной трудоемкости работ на всех переделах производственного цикла.

Решение обозначенной задачи позволит обосновать практическую значимость подхода управления резервами времени в условиях действующего производства для оптимизации производства, снижения запасов изделий на складе готовой продукции пред-

приятий и повышения эффективности производства широкой номенклатуры изделий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования были разделены на отдельные этапы. Алгоритм проведения исследований, включая основные задачи и применяемые методы исследований, представлен на рис. 1.

Основываясь на выдвинутой в работе [10] теории непосредственного влияния на эффективность организации производства конструктивных решений и технологических особенностей производства изделий, разработана система оценки сложности изделий.

Сложность изделий предлагается оценивать системой критериев, которые характеризуются показателями трудоемкости на всех переделах производственного цикла. Установленные критерии являются базой для обеспечения равновесной трудоемкости при планировании раскладки изделий, достижения ритмичности производства, повышения эффективности производства при выпуске широкой номенклатуры изделий.

Для апробации выдвигаемой гипотезы выполнен анализ месячной производственной программы линии циркуляции паллет, специализированной на выпуск плит перекрытия. Общее количество изделий в программе составило 1146 шт. При этом 58 изделий относились к доборным изделиям различного назначения (разделительные стенки, плиты лоджий). Таким образом, общее количество плит перекрытия в месячной производственной программе составило 1088 изделий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что основным фактором, влияющим на эффективность производства, в том числе расход энергоресурсов и ритмичность производства, является раскладка изделий в формах [11, 12]. Только за счет оптимизации раскладки изделий и достижения максимальной загрузки форм можно до 23 % сократить расход энергоресурсов на тепловлажностную обработку изделий и более чем на 20 % количество производственных циклов [12]. В сложившейся практике планирования раскладки изделий ключевой будет задача достижения максимальной загрузки форм и тем самым повышения объема бетона в одной формовке. Однако анализ организационных решений показал, что при таком одностороннем подходе производственные потери прежде всего связаны с просчетами в назначении продолжительности ритма производства.

Достижение максимальной загрузки форм при планировании раскладки изделий и игнорирование при этом конструктивных особенностей изделий, влияющих на показатели трудоемкости, могут стать следствием неравнозначности показателей трудоемкости для отдельных форм и продолжительности операций в технологическом цикле производства. По-

¹ ОНТП 07–85. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона : введ. 01.01.1986 (вместо ОНТП-7–80. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона). М. : Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1986. 51 с.

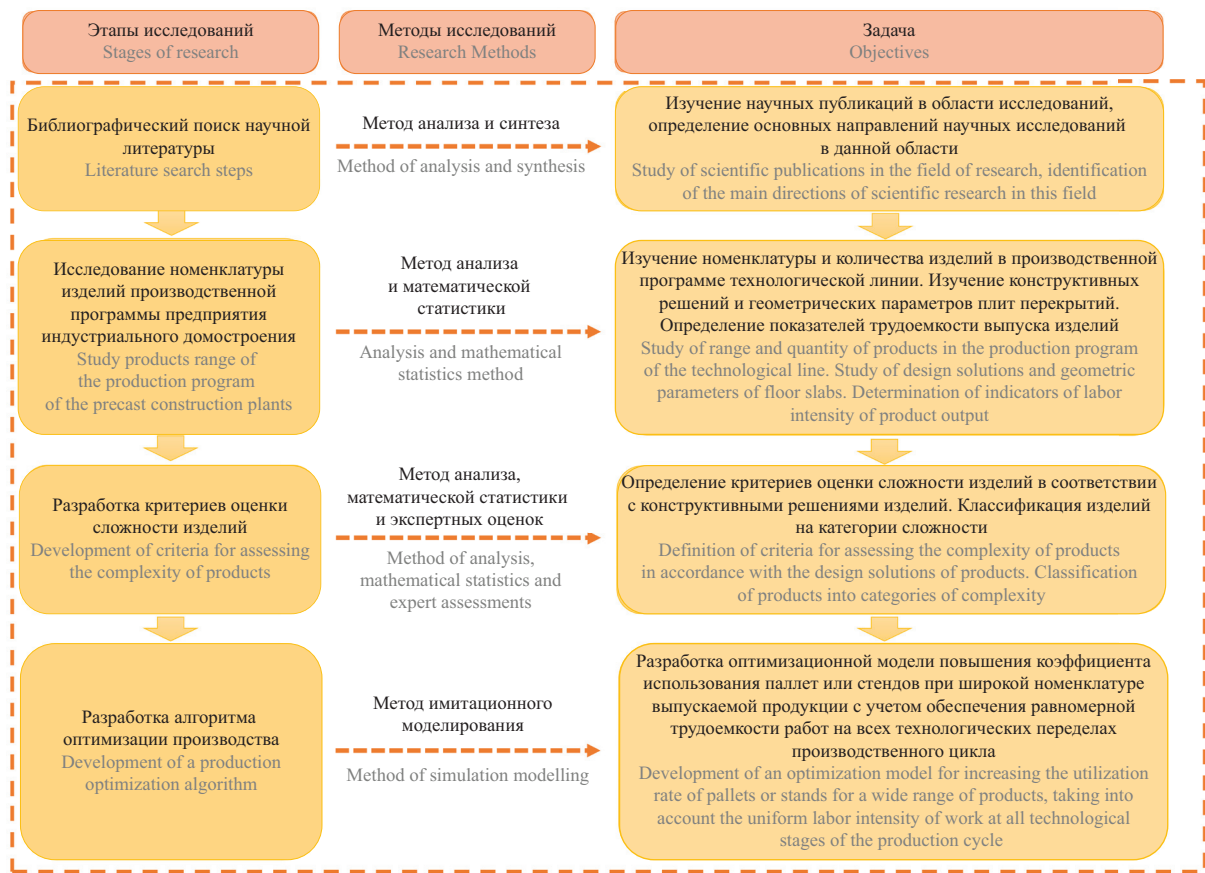


Рис. 1. Алгоритм проведения исследований
Fig. 1. Research algorithm

явление таким образом узких мест приводит к простоям на технологических постах и неритмичности производства, при этом организация производства в таком виде не соответствует критериям поточности производства. Отсюда вытекают срывы поставки комплектующих, расходных материалов и бетонной смеси к постам производственной линии, а также графиков поставки изделий на строительные площадки.

Определение критериев оценки сложности изделий — актуальная задача организации производственного процесса. Установленное в отечественной практике нормирование ритма производства только в зависимости от типа и габаритов изделий, объема бетона в изделии характеризует прежде всего трудоемкость на постах формования изделий. Это в свою очередь не обеспечивает достаточной объективности трудоемкости производства широкой номенклатуры изделий на всех этапах производственного цикла.

Постоянно растущие требования к качеству и внешнему виду изделий, производство изделий максимальной заводской комплектации, возведение зданий с индивидуальными архитектурными и конструктивными решениями, современные проектные решения скрытого монтажа инженерных систем требуют большей трудоемкости и ручного труда на постах армирования и монтажа закладных деталей, механической доводки поверхностей изделий и др. Вследствие этого

необходима всесторонняя оценка сложности изделий с учетом металлоемкости, конструктивных решений и требований к качеству поверхностей изделий.

Анализ производственной программы технологической линии производства плит перекрытия показал, что изделия характеризуются значительными колебаниями по объему от 0,55 до 3,4 м³ и колебаниями показателей трудоемкости изделий от 2,0 до 17,0 чел.-ч. Как показал статистический анализ данных, между объемом изделий и показателями трудоемкости зависимость отсутствует. На рис. 2 представлено распределение изделий в номенклатуре производственной программы по объему в категориях до 1, от 1 до 2, от 2 до 3 и более 3 м³.

Распределение показателей трудоемкости в зависимости от объема изделий в обозначенных выше категориях приведено на рис. 3.

Анализируя данные на рис. 3, следует отметить, что для 25 % изделий категории 1,0–2,0 м³ трудоемкость производства соотносится с изделиями категории до 1,0 м³. При этом для изделий категории более 3,0 м³ трудоемкость ниже или соответствует 25 % изделий категории 2,0–3,0 м³. Приведенные данные свидетельствуют о зависимости трудоемкости изделий прежде всего от конструктивных решений и актуальности предлагаемого подхода оценки сложности изделий.

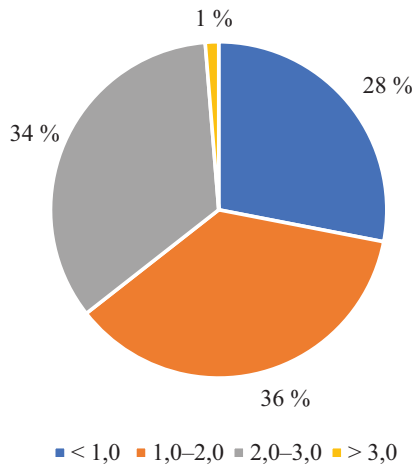


Рис. 2. Распределение изделий в номенклатуре производственной программы в зависимости от их объема

Fig. 2. Distribution of structures in the range of products in the production program depending on their volume

На основе выполненного анализа можно утверждать, что разработка решений оптимизации производства после ввода технологических линий в эксплуатацию с учетом конструктивных решений изделий является объективным требованием обеспечения эффективности производства. При этом основным этапом реализации разработанного подхода для обеспечения ритмичности производства является проектирование раскладки изделий в формах технологических линий.

В предлагаемой методике на примере плит перекрытия для каждого изделия методом экспертных оценок были установлены индикаторы сложности. Важность индикатора зависит от степени влияния на трудоемкость производства. В соответствии с индикаторами сложности изделия условно разделены на 5 категорий (табл.).

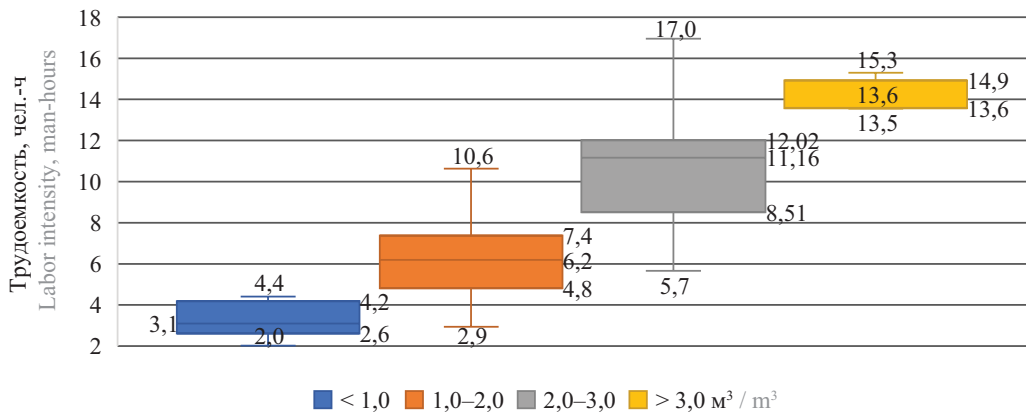


Рис. 3. Распределение показателей трудоемкости в зависимости от объема изделий

Fig. 3. Distribution of labor intensity indicators depending on the volume of products

Классификация изделий по критериям сложности

Classification of products by complexity criteria

Категория сложности Difficulty category	Индикаторы сложности / Complexity Indicators	Трудоемкость производства, чел.-ч/м³ / Production labor intensity, man-hours/m³
I	Плиты цоколя и кровли, рядовые плиты без электрики / Basement and roof slabs, row slabs without electrics	2,8
II	Плиты кровли и рядовые плиты с несложной электрикой. Количество закладных деталей более 5 шт. Наличие второй (верхней) сетки и вкладышей. Плиты с установкой закладных деталей для крепления парапета Roof slabs and row slabs with uncomplicated electrics. The number of embedded parts is more than 5 pcs. Presence of the second (upper) grid and liners. Slabs with installation of embedded parts for fixing the parapet	3,15
III	Плиты со сложной электрикой (большое количество каналов или наличие полиэтиленовой трубы). Плиты с универсальным вентблоком или нишей под вентблок. Плиты без электрики, но с устройством штраб Slabs with complex electrics (large number of ducts or HDPE pipe). Slabs with universal ventblock or niches for the ventilation block. Slabs without electrics, but with the device of punches	4,3

Окончание табл. / End of the Table

Категория сложности Difficulty category	Индикаторы сложности / Complexity Indicators	Трудоемкость производства, чел.-ч/м³ / Production labor intensity, man-hours/m³
IV	Плиты с электрикой и с устройством штраб. Плиты с габаритами по высоте в диапазоне 3280–3580 мм Slabs with electrics and with punches. Slabs with height dimensions in the range of 3,280–3,580 mm	4,5
V	Плиты особо сложные (плиты с большим количеством вкладышей, дополнительными вкладышами под вентблок, с наличием усиленного армирования, консольные плиты). Плиты с габаритами по высоте более 3580 мм Specially complex slabs (slabs with a large number of inserts, additional inserts under the vent block, with reinforced reinforcement, cantilever slabs). Slabs with height dimensions of more than 3,580 mm	6,4

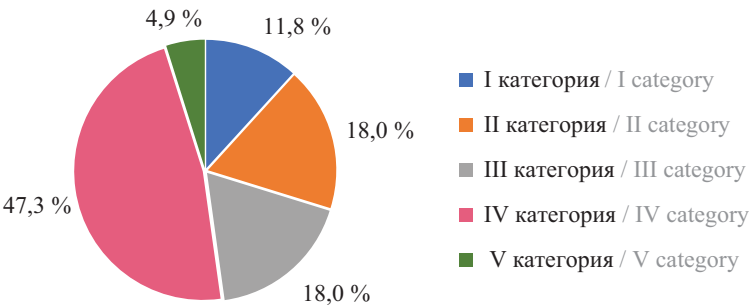


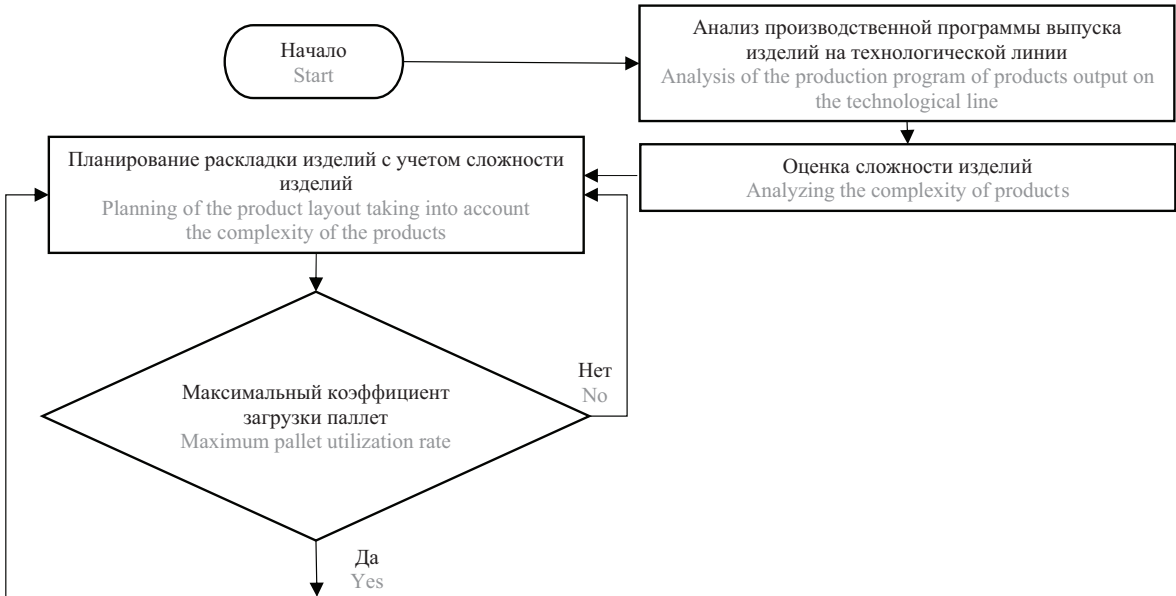
Рис. 4. Количественное распределение изделий по категориям в производственной программе

Fig. 4. Quantitative distribution of products by category in the production program

Количественное распределение изделий в зависимости от категории сложности в производственной программе представлено на рис. 4.

Полученные данные свидетельствуют о неэффективности одностороннего подхода к планированию раскладки изделий только с учетом достижения максимальной загрузки форм. В соответствии с этим для планирования раскладки изделий в произ-

водственных условиях с учетом совокупности факторов, определяющих загрузку форм и конструктивные решения изделий, требуется разработка соответствующей методологии. На основании проведенных натурных исследований предложен алгоритм назначения оптимальных технологических параметров производственных линий после ввода их в эксплуатацию с учетом оценки сложности изделий (рис. 5).



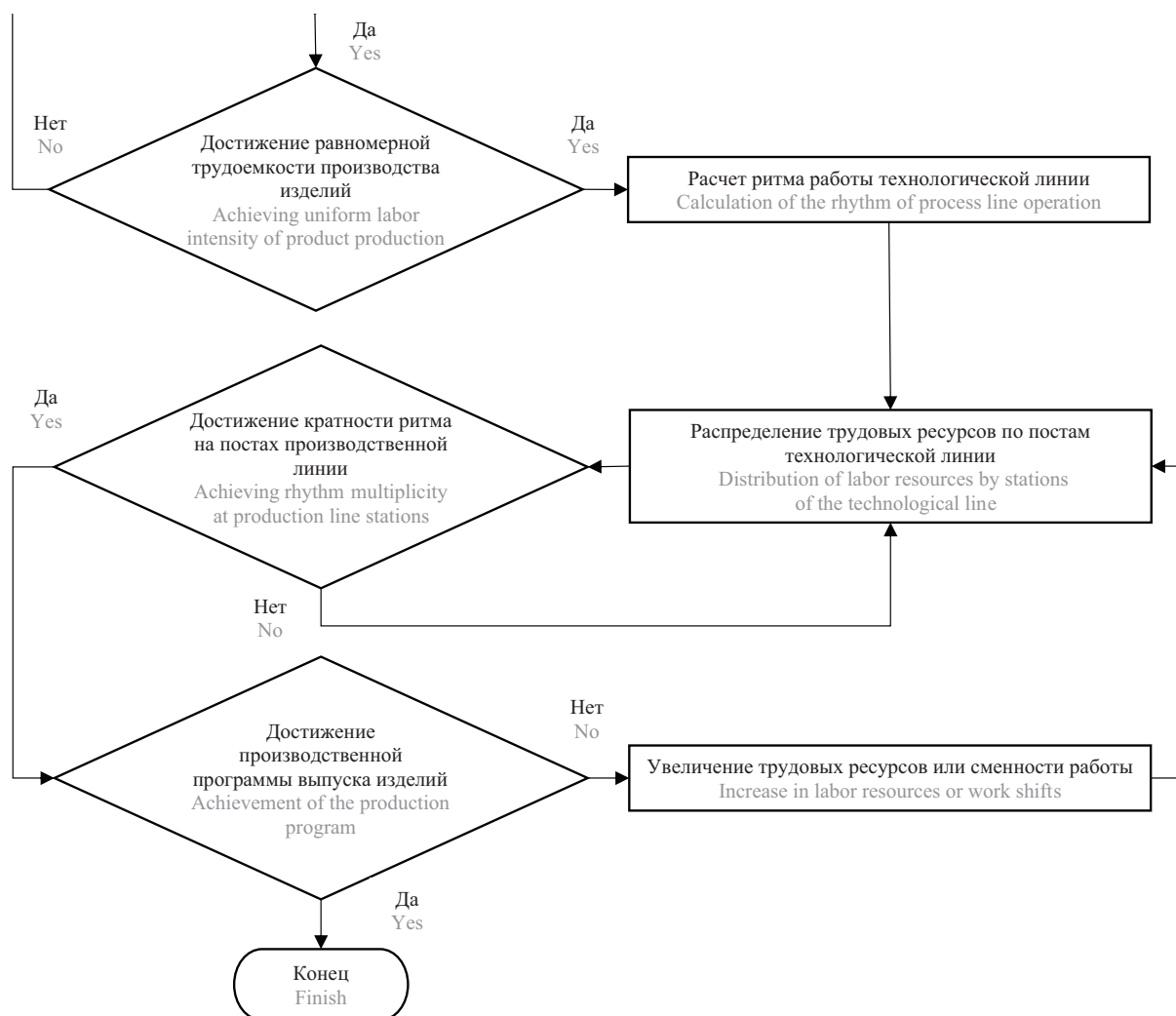


Рис. 5. Алгоритм оптимизации производства с учетом сложности изделий

Fig. 5. Algorithm for optimizing production taking into account the complexity of products

Предлагаемый алгоритм отличается от практи-
куемой раскладки изделий обеспечением взаимосвя-
зи двух ключевых требований: организации макси-
мальной загрузки форм и достижения равномерной
трудоемкости производства для каждой формы.
Решение реализуется на основе предложенного
подхода классификации изделий в номенклатуре
на категории по показателям трудоемкости их про-
изводства. Формируя на первом этапе равновесную
трудоемкость путем раскладки изделий с учетом
их категорий, на втором этапе выполняется оценка
загрузки форм. При соответствии установленных
критериев назначаются параметры производства
и трудовые ресурсы для обеспечения производ-
ственной программы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определены основные направления оптимиза-
ции комплектного выпуска продукции и обеспече-
ния непрерывности поставки изделий на строитель-
ные площадки в условиях широкой номенклатуры

изделий. Основываясь на проведенном анализе из-
вестных подходов, установлено, что продуктивным
с точки зрения сокращения продолжительности
технологического процесса, равномерного распре-
деления трудовых ресурсов и соблюдения графиков
поставки изделий на строительные площадки яв-
ляется создание и управление резервами времени
в производстве за счет обеспечения ритмичности
производства.

В соответствии с задачами исследований пред-
ложен и апробирован подход нормирования ритма,
отличающийся от известных учетом конструктивных
решений изделий. Актуальность учета конструктив-
ных решений изделий при оптимизации выпуска
широкой номенклатуры изделий обоснована ре-
зультатами анализа производственной программы
выпуска плит перекрытия. Установлены колебания
показателей трудоемкости производства изделий
в диапазоне 2,0–17,0 чел.-ч. Предпринятая попытка
определить зависимость показателей трудоемкости
от объема формируемого изделия зафиксировала от-
сутствие функциональной зависимости. При этом

установленные факты более высокой трудоемкости производства для изделий с меньшим объемом бетона подтверждают гипотезу о влиянии на показатели трудоемкости прежде всего конструктивных особенностей изделий. На базе полученных данных предложена система оценки сложности изделий с учетом их конструктивных решений по индикаторам сложности, которые могут назначаться методом экспертных оценок на производстве.

Обосновано, что ритмичность производства в условиях выпуска широкой номенклатуры изделий в первую очередь достигается планированием раскладки изделий с условием обеспечения равновесной трудоемкости для каждой формы в производственном цикле

на основании учета конструктивных решений и сложности изделий.

Практическая реализация предложенной системы оценок изделий представлена в виде алгоритма назначения оптимальных технологических параметров, который обеспечивает одновременно равновесную трудоемкость и оптимальную раскладку изделий и тем самым ритмичность производства. Такой подход к организации производства является новым и малоизученным в отечественной практике управления производством, позволяет реализовать многофакторный подход оптимизации производства в условиях выпуска широкой номенклатуры изделий на основе управления и создания резервов времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Граник Ю.Г., Полтавцев С.И. Реконструкция и техническое перевооружение предприятий полного домостроения. М.: Стройиздат, 1989. 268 с.

2. Климкин К.А. Методические основы оценки использования производственных мощностей домостроительных предприятий в условиях инвестиционного спада: дис. ... канд. эконом. наук. Хабаровск, 1998. 141 с. EDN NLMYBX.

3. Джалилов Ф.Ф. Разработка методов формирования организационно-технологических решений по реконструкции действующих предприятий: дис. ... канд. техн. наук. М., 1996. 356 с. EDN QCYJXZ.

4. Николаев С.В. Оптимизация проектных и производственных решений технологии производства изделий крупнопанельного домостроения: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 399 с. EDN NPKZGZ.

5. Алешина Л.С. Унификация сборных железобетонных изделий полносборного домостроения на основе заводского производства: дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 166 с. EDN NPHNUB.

6. Гуринович В.Ю. Исследование влияния номенклатуры изделий на показатели производственной мощности предприятий индустриального домостроения // Наука и техника. 2024. Т. 23. № 2. С. 128–139. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-2-128-139. EDN SJCPWU.

7. Wang Z., Hu H., Gong J. Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components // Automation in Construction. 2018. Vol. 86. Pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.026

8. Ma Z., Yang Z. Liu S. Wu S. Optimized Rescheduling of Multiple Production Lines for Flowshop Production of Reinforced Precast Concrete Components // Automation in Construction. 2018. Vol. 95. Pp. 86–97. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.002

9. Li X., Li Z., Wu G. Lean precast production system based on the CONWIP method // KSCE Journal of

Civil Engineering. 2018. Vol. 22. Issue 7. Pp. 2167–2177. DOI: 10.1007/s12205-017-2009-4

10. Yuan Z., Qiao Y., Guo Y., Wang Y., Chen C., Wang W. Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Issue 1. DOI: 10.1155/2020/8814914

11. Khalili A., Chua D.K. Integrated prefabrication configuration and component grouping for resource optimization of precast production // Journal of Construction Engineering and Management. 2014. Vol. 140. Issue 2. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000798

12. Wang D., Liu G., Li K., Wang T., Shrestha A., Martek I. et al. Layout optimization model for the production planning of precast concrete building components // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 6. P. 1807. DOI: 10.3390/su10061807

13. Al-Bazi A., Dawood N. Developing crew allocation system for the precast industry using genetic algorithms // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2010. Vol. 25. Issue 8. Pp. 581–595. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2010.00666.x

14. Benjaoran V., Dawood N. Intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products // Automation in Construction. 2006. Vol. 15. Issue 6. Pp. 737–745. DOI: 10.1016/j.autcon.2005.09.007

15. Liu Z., Liu Z., Liu M., Wang J. Optimization of Flow Shop Scheduling in Precast Concrete Component Production via Mixed-Integer Linear Programming // Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/6637248

16. Wang Z., Hu H. Dynamic response to demand variability for precast production rescheduling with multiple lines // International Journal of Production Research. 2018. Vol. 56. Issue 16. Pp. 5386–5401. DOI: 10.1080/00207543.2017.1414970

17. Ruan M., Xu F. Improved eight-process model of precast component production scheduling considering

resource constraints // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2022. Vol. 28. Issue 3. Pp. 208–222. DOI: 10.3846/jcem.2022.16454

18. Jiang W., Wu L. Flow shop optimization of hybrid make-to-order and make-to-stock in precast concrete component production // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 297. P. 126708. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126708

19. Гуринович В.Ю., Поздняков Д.А., Леонович С.Н. Мониторинг работы и определение опти-

мальных технологических параметров линий циркуляции паллет // *Строительные материалы*. 2022. № 3. С. 4–8. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-800-3-4-9. EDN AFEOQG.

20. Wang Z., Liu Y., Hu H., Dai L. Hybrid rescheduling optimization model under disruptions in precast production considering real-world environment // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2021. Vol. 47. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001976

Поступила в редакцию 25 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 22 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виталий Юрьевич Гуринович** — старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологии строительства; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 65; Gurinovich@bntu.by;

Дмитрий Александрович Поздняков — заместитель директора — главный инженер; **Республиканское унитарное предприятие «Институт жилища — Научно-исследовательский и проектно-технологический институт стройиндустрии им. Атаева С.С.» (Институт жилища — НИПТИС им. Атаева С.С.)**; 220076, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ф. Скорины, д. 15; pozddzm@mail.ru;

Сергей Николаевич Леонович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологии строительства; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 65; Sleonovich@mail.ru.

Вклад авторов:

Гуринович В.Ю. — идея, планирование исследований, сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Поздняков Д.А. — сбор и анализ материалов, обработка материалов, оформление текста.

Леонович С.Н. — научное руководство и редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Granik Yu.G., Poltavtsev S.I. *Reconstruction and technical re-equipment of fully precast construction plants*. Moscow, Stroyizdat, 1989; 268. (rus.).

2. Klimkin K.A. *Methodological bases for assessing the utilization of production capacities of house-building plants in the conditions of investment recession : thesis of candidate of economic sciences*. Khabarovsk, 1998; 141. EDN NLMYBX. (rus.).

3. Dzhililov F.F. *Development of methods for forming organizational and technological solutions for the conclusion of existing plants : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 1996; 356. EDN QCYJXZ. (rus.).

4. Nikolaev S.V. *Optimization of design and production solutions production technology of precast structures : thesis of doctor of technical sciences*. Moscow, 1981; 399. EDN NPKZGZ. (rus.).

5. Aleshina L.S. *Unification of prefabricated reinforced concrete products of full prefabricated house building on the basis of factory production : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 1984; 166. EDN NPHNUB. (rus.).

6. Gurinovich V.Yu. Study of influence of product range on production capacity indicators of precast construction plants. *Science and Technique*. 2024; 23(2):128-139. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-2-128-139. EDN SJCPWU. (rus.).

7. Wang Z., Hu H., Gong J. Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components. *Automation in Construction*. 2018; 86:69-80. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.026

8. Ma Z., Yang Z., Liu S., Wu S. Optimized Rescheduling of Multiple Production Lines for Flowshop Production of Reinforced Precast Concrete Components. *Automation in Construction*. 2018; 95:86-97. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.002

9. Li X., Li Z., Wu G. Lean precast production system based on the CONWIP method. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018; 22(7):2167-2177. DOI: 10.1007/s12205-017-2009-4

10. Yuan Z., Qiao Y., Guo Y., Wang Y., Chen C., Wang W. Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete

Event Simulation. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020(1). DOI: 10.1155/2020/8814914

11. Khalili A., Chua D.K. Integrated prefabrication configuration and component grouping for resource optimization of precast production. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2014; 140(2). DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000798

12. Wang D., Liu G., Li K., Wang T., Shrestha A., Martek I. et al. Layout optimization model for the production planning of precast concrete building components. *Sustainability*. 2018; 10(6):1807. DOI: 10.3390/su10061807

13. Al-Bazi A., Dawood N. Developing crew allocation system for the precast industry using genetic algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2010; 25(8):581-595. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2010.00666.x

14. Benjaoran V., Dawood N. Intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products. *Automation in Construction*. 2006; 15(6):737-745. DOI: 10.1016/j.autcon.2005.09.007

15. Liu Z., Liu Z., Liu M., Wang J. Optimization of Flow Shop Scheduling in Precast Concrete Component Production via Mixed-Integer Linear Programming. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/6637248

16. Wang Z., Hu H. Dynamic response to demand variability for precast production rescheduling with multiple lines. *International Journal of Production Research*. 2018; 56(16):5386-5401. DOI: 10.1080/00207543.2017.1414970

17. Ruan M., Xu F. Improved eight-process model of precast component production scheduling considering resource constraints. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2022; 28(3):208-222. DOI: 10.3846/jcem.2022.16454

18. Jiang W., Wu L. Flow shop optimization of hybrid make-to-order and make-to-stock in precast concrete component production. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 297:126708. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126708

19. Gurinovich V.Yu., Pozdniakov D.A., Leonovich S.N. Monitoring of operation and determination of optimal technological parameters of pallet circulation lines. *Construction Materials*. 2022; 3:4-8. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-800-3-4-9. EDN AFEOQG. (rus.).

20. Wang Z., Liu Y., Hu H., Dai L. Hybrid rescheduling optimization model under disruptions in precast production considering real-world environment. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2021; 47(4). DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001976

Received April 25, 2024.

Adopted in revised form on July 16, 2024.

Approved for publication on January 22, 2025.

B I O N O T E S: **Vitaliy Yu. Gurinovich** — senior lecturer of the Department of Building Materials and Construction Technology; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus; Gurinovich@bntu.by;

Dmitrii A. Pozdnyakov — deputy director — chief engineer; **Republican Unitary Enterprise “Institute of Housing — Research and Design and Technological Institute of the Construction Industry named after Ataeva S.S.” (Institute of housing — NIPTIS named after Atayev S.S.)**; 15 F. Skorina st., Minsk, 220076, Republic of Belarus; pozddzm@mail.ru;

Sergey N. Leonovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Construction Technology; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus; Sleonovich@mail.ru.

Contribution of the authors:

Vitaliy Yu. Gurinovich — conceptualization, research planning, data gathering and processing, writing of the article, conclusions.

Dmitrii A. Pozdnyakov — data gathering and analyzing materials, processing of materials, text layout.

Sergey N. Leonovich — scientific editing of the text, supervision.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 625.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.429-439

Сценарии эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог в условиях действующего нормативного регулирования

Артём Николаевич Тиратурян, Андрей Викторович Воробьев, Чунь Ян

Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из определяющих концепций дорожной отрасли является концепция 12/24, принятая Постановлением Правительства РФ от 30.05.2017 № 658 и регламентирующая нормативный срок службы до ремонта автомобильной дороги (а. д.) 12 лет и до капитального ремонта 24 года. При этом в пределах 12-летнего срока службы возможно выполнение работ по восстановлению слоев износа/защитных слоев, периодичность которых устанавливается отдельными нормативными актами и зависит от интенсивности движения и эксплуатационного состояния. Прогнозирование изменения основных эксплуатационных показателей а. д. с учетом влияния управляющих воздействий в виде содержания, ремонта и капитального ремонта позволит проанализировать различные варианты стратегий обеспечения их сохранности.

Материалы и методы. Для прогнозирования изменения основных эксплуатационных показателей а. д. применяются феноменологические модели ухудшения продольной и поперечной ровности покрытия автодороги, а также общего модуля упругости и коэффициента прочности на ее поверхности.

Результаты. Модифицирована зависимость для прогнозирования изменения общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды в течение ее срока службы, представляющая собой убывающую функцию общего модуля упругости от суммарного числа приложенных расчетной нагрузки и соответственно времени эксплуатации. Модифицированы зависимости для прогнозирования изменения фактической продольной ровности и колеяности путем введения дополнительного множителя, характеризующего общую потерю прочности на прогнозный год. С учетом модифицированных зависимостей построены сценарии эксплуатационной стадии жизненного цикла (ЖЦ) для модельной конструкции дорожной одежды а. д. и реальной автодороги, эксплуатирующейся в Ростовской области.

Выводы. Получены модифицированные зависимости, позволяющие описывать процессы ухудшения продольной ровности покрытия и колеяности с учетом снижения общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды. Построены различные проектные сценарии эксплуатационной стадии ЖЦ а. д. для тестового и реального примера. Предложены направления совершенствования методов анализа ЖЦ автодорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильные дороги, эксплуатационная стадия жизненного цикла, уровень сохранности, управляющие воздействия, сценарии, эксплуатационные параметры, стратегии ремонтных работ

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00110 (URL: <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>). Авторы выражают искреннюю благодарность уважаемым рецензентам за время и силы, затраченные на рассмотрение данной статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тиратурян А.Н., Воробьев А.В., Ян Ч. Сценарии эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог в условиях действующего нормативного регулирования // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 429–439. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.429-439

Автор, ответственный за переписку: Андрей Викторович Воробьев, andreyvorobyev19@mail.ru.

Scenarios of the operational stage of the road life cycle under the current regulatory environment

Artem N. Tiraturyan, Andrey V. Vorobev, Chun Yang

Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the defining concepts of the road sector is the concept of 12/24 adopted by the Russian Government Decree of May 30, 2017 No. 658, and regulating the normative service life before repair of a highway is 12 years and before major repair 24 years. At the same time, within the 12-year service life, it is possible to perform works on restoration of wear layers/protective layers, the frequency of which is established by separate normative acts and depends on the traffic intensity and operational condition. Forecasting of changes in the main operational indicators of the highway taking into account the influence of control actions in the form of maintenance, repair and overhaul will make it possible to analyze various options of strategies to ensure their preservation.

Materials and methods. Phenomenological models of deterioration of longitudinal and transverse flatness of the road surface, as well as the total modulus of elasticity and the coefficient of strength on its surface are used to predict changes in the main operational indicators of highways.

Results. Modified the dependence for predicting the change in the total modulus of elasticity on the pavement surface during its service life, which is a decreasing function of the total modulus of elasticity from the total number of design load applications and, respectively, the service time. The dependencies for predicting the change in actual longitudinal flatness and rutting were modified by introducing an additional multiplier characterizing the total loss of strength for the predicted year. Taking into account the modified dependencies the scenarios of the operational stage of the life cycle for the model construction of road pavement of the highway and the real highway operated in the Rostov region were built.

Conclusions. Modified dependencies allowing to describe the processes of deterioration of longitudinal flatness of the pavement and rutting taking into account the reduction of the total modulus of elasticity on the surface of the pavement were obtained. Various design scenarios of the operational stage of the life cycle of a highway for a test and real example were constructed. The directions of improvement of methods for analyzing the life cycle of highways are proposed.

KEYWORDS: highways, operational stage of life cycle, preservation level, control actions, scenarios, operational parameters, repair strategies

Acknowledgements. The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00110 (URL: <https://rscf.ru/project/24-29-00110/>). The author also expresses sincere gratitude to the respected reviewers for the time and effort spent on reviewing this article.

FOR CITATION: Tiraturyan A.N., Vorobev A.V., Yang Ch. Scenarios of the operational stage of the road life cycle under the current regulatory environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):429-439. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.429-439 (rus.).

Corresponding author: Andrey V. Vorobev, andreyvorobeyv19@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления жизненным циклом (ЖЦ) автомобильных дорог (а. д.) имеют серьезное техническое и экономическое значение. С одной стороны, выбор оптимальной комбинации и сроков выполнения работ по содержанию, ремонту, капитальному ремонту а. д. имеет большое значение для обеспечения комфорта и безопасности движения пользователей. С другой — всегда представляет собой оптимизационную задачу, требующую поиска оптимума между долговечностью и высоким транспортно-эксплуатационным состоянием автодороги и экономическими затратами, расходуемыми на его поддержание. Большое внимание в последние годы уделяется вопросам интеграции технологии информационного моделирования в практику управления ЖЦ а. д. Этому посвящены работы ученых, разработавших структуру и основной методологический аппарат технологий информационного моделирования в привязке к отечественной нормативной и научно-технической базе [1–3]. Большой вклад в развитие экономического аппарата анализа ЖЦ автодорог внесен профессором Э.В. Дингесом и его научной школой, разработавшим нормативный документ ОДМ 218.4.023–2015 «Методические рекомендации по оценке эффективности строительства, реконструкции, капитального ремонта и ремонта автомобильных дорог». В работе [4] представлена формула расчета удельной стоимости ЖЦ на единицу гарантийного срока функционирования дорожного сооружения:

$$DZ_v^{уд} = \left(\frac{\frac{K_{ctf}}{(1+E)^f} + \sum_{i=1}^n \frac{K_{kpi}}{(1+E)^{t_i}} + \sum_{j=1}^m \frac{K_{pj}}{(1+E)^{t_j}}}{T} + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+E)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{\Pi_t}{(1+E)^t} - \frac{K_{остf}}{(1+E)^T} \right), \quad (1)$$

где v — порядковый номер рассматриваемой альтернативы ЖЦ дорожного сооружения; K_{ctf} — затраты на строительство/реконструкцию дорожного сооружения в f -м году; f — год строительства; K_{kpi} — затраты на капитальный ремонт дорожного сооружения в i -м году; t_i — год проведения i -го капитального ремонта; K_{pj} — затраты на ремонт в j -м году; t_j — год проведения j -го капитального ремонта; T — продолжительность ЖЦ дорожного сооружения; t — год проведения t -го капитального ремонта; C_t — затраты на содержание дорожного сооружения в году t ; Π_t — социально-экономические потери от снижения потребительских качеств дорожного сооружения в t -м году; $K_{остf}$ — эффект последствия (остаточная стоимость дорожного сооружения) на год T .

В целом данная зависимость охватывает большую часть этапов ЖЦ автомобильной дороги, включая строительство, эксплуатационную стадию и этап реконструкции.

Вместе с тем следует отметить, что ни в одном отечественном документе нет формализации эксплуатационной стадии ЖЦ а. д. с точки зрения комплексного прогнозирования изменения ее транспортно-эксплуатационного состояния.

Тем не менее существуют труды и документы, позволяющие наметить пути к созданию подобных методов. В первую очередь это опыт государственной компании «Российские автомобильные дороги», акмулированный в ряде СТО АВТОДОР, касающихся управления состоянием автомобильных дорог, в частности СТО АВТОДОР 2.4–2013 «Оценка остаточного ресурса жестких дорожных конструкций автомобильных дорог Государственной компании «Российские автомобильные дороги» и СТО АВТОДОР 2.28–2016 «Прогнозирование состояния эксплуатируемых автомобильных дорог Государственной компании «Автодор» (приказ от 06.05.2016 № 67). В этих документах содержатся прогнозные зависимости для определения изменений коэффициента прочности,

продольной ровности покрытия, поперечной ровности покрытия (колеи), коэффициента сцепления. Результаты, получаемые с использованием данных документов, анализируются и рассматриваются в статьях [5–10] преимущественно без учета влияния работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту, выполняемых в ходе эксплуатации дороги в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 30.05.2017 № 658, регламентирующим нормативный срок службы до ремонта автомобильной дороги — 12 лет и до капитального ремонта — 24 года.

В зарубежной практике изучению влияния работ по содержанию, ремонту, капитальному ремонту также уделяется большое внимание. В 2013 г. был опубликован научно-технический отчет FHWA-HRT-13-039 [11], впервые декларирующий важность оценки не просто остаточного срока службы или остаточного ресурса до перехода дорожной одежды автомобильной дороги в предельное состояние, т.е. в состояние, соответствующее необходимости выполнения капитального ремонта, но и оценки так называемого «остаточного интервала обслуживания» (remaining service interval — RSI), т.е. срока службы между работами по замене слоев износа/защитных слоев или ремонта покрытия. Концепция RSI в последние годы стала превалирующей в трудах зарубежных специалистов в области управления ЖЦ а. д. Так, в публикациях [12–18] описывается внедрение данной концепции преимущественно на сетевом уровне, направленное на формирование бюджетных оценок в рамках различных сценариев обеспечения сохранности а. д. Приводится информация о выборе управляющих воздействий в зависимости от основных показателей эксплуатационного состояния автомобильных дорог, к которым, как правило, относят продольную ровность покрытия, колеи, по-

крытии и процент протяженности полос, покрытый сеткой усталостных трещин (рис. 1).

Важно отметить, что в рамках концепции RSI в контексте выбора управляющих воздействий рассматривается достаточно длительный анализируемый период — 40 лет. Расчет различных стратегий осуществляется на базе разных феноменологических моделей, описывающих ухудшение ключевых показателей эксплуатационного состояния, или интегральных показателей типа PCR, PSI, PCI и пр. Документ [11] рекомендует для этих целей использование механико-эмпирических зависимостей, приведенных в Руководстве по механико-эмпирическому проектированию новых и реконструируемых дорожных одежд [20], либо эмпирических моделей на основе регрессионных зависимостей, байесовской вероятности, кривых выживаемости и т.д. Различные модели, описывающие изменение ровности и колеиности во времени, также применяются и в других странах. В частности, в имеющем большую популярность программном комплексе ELMOD, выпускаемом одним из ведущих мировых производителей дорожного диагностического оборудования компанией Dynatest, также реализованы достаточно простые феноменологические модели изменения продольной и поперечной ровности покрытия, позволяющие на этапе проектирования просчитывать сроки назначения управляющих воздействий [21].

Таким образом, проведенный анализ показывает, что как в отечественной, так и в зарубежной практике большое внимание уделяется проработке различных сценариев эксплуатационной стадии ЖЦ на этапе проектирования. В зарубежной практике этот вопрос систематизирован и практически все модели прогнозирования изменения эксплуатационного состояния встроены в отдельный модуль управления ЖЦ автодорог.

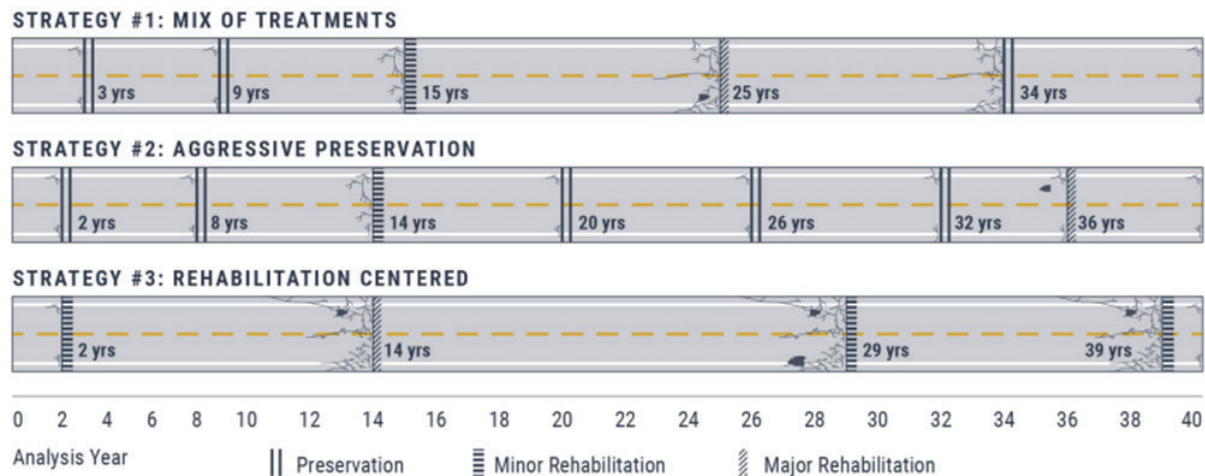


Рис. 1. Различные варианты стратегий обеспечения сохранности дороги (источник FHWA-HRT-21-006: TechNote: Remaining Service Interval: A White Paper (dot.gov) [19])

Fig. 1. Different options for road safety strategies (source FHWA-HRT-21-006: TechNote: Remaining Service Interval: A White Paper (dot.gov) [19])

В Российской Федерации в последние годы был достигнут значительный прогресс в части внедрения прогнозных моделей основных эксплуатационных параметров дорожной одежды автомобильной дороги. Однако практически не изученным остается вопрос построения проектных кривых работоспособности в течение директивного срока службы а. д., учитывающих возможные управляющие воздействия в течение межремонтного срока 24 года. Построению подобных сценариев и совершенствованию существующих подходов и посвящена данная статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Построение кривых работоспособности дорожных одежд а. д. в условиях системы технического регулирования РФ требует применения математических моделей, позволяющих осуществлять прогноз критических видов дефектов и повреждений, на основе которых возможно определение момента перехода конструкции в предельное состояние (табл. 1). Исходя из опыта эксплуатации а. д., а также нормативных документов, регламентирующих процесс диагностики дорог, такие показатели представлены в табл. 2.

Конкретный вид зависимостей, используемых для прогнозирования момента наступления различных видов управляющих воздействий в соответствии с СТО АВТОДОР 10, представлен в формулах (2)–(5):

h_k = a \left(1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{i=1}^T N_p \right)^b; \tag{2}

IRI = IRI_0 + a \sum_{i=1}^T N_p^b; \tag{3}

E = \sqrt{\frac{P}{600}} 98,65 \left(\lg \sum_{i=1}^T N_p - c \right); \tag{4}

\sum_{i=1}^T N_p = 0,7 f_{пол} N_p k_n T_{рлг} \frac{q^{T_{сл} - T} - 1}{(q - 1) q^{(T_{сл} - T) - 1}}, \tag{5}

где a, b — эмпирические параметры, определяемые по СТО АВТОДОР 2.28–2016 «Прогнозирование состояния эксплуатируемых автомобильных дорог

Государственной компании “Автодор”»; \sum_{i=1}^T N_p — суммарное число приложений расчетной нагрузки; c — параметр, зависящий от величины расчетной нагрузки (для расчетной нагрузки 115 кН принимается равным c = 3,2); T_{рлг} — количество расчетных дней в году; q — коэффициент прироста интенсивности движения; T_{сл} — срок службы; T — год, на который осуществляется прогнозирование, при этом T \in [0; T_{сл} - 1].

Применение зависимостей (1)–(4) дает возможность представить эксплуатационную стадию ЖЦ а. д. на этапе проектирования, ограничиваясь рамками, регулируемые Постановлением Правительства. Пример графического представления эксплуатационной стадии ЖЦ а. д. с дорожной одеждой (табл. 3) приведен на рис. 2.

Табл. 1. Математические модели прогнозирования критериев, определяющих необходимость управляющего воздействия на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги

Table 1. Mathematical models for predicting the criteria determining the need for control action at the operational stage of the road life cycle

Вид управляющего воздействия Type of control action	Показатель Indicator	Математическая модель Mathematical model
Содержание/замена слоев износа Maintenance/replacement of wear layers	Колея/износ Track/wear	y = ax^b
Ремонт Repair	Продольная ровность покрытия Longitudinal flatness of the pavement	y = ax^b + c
Капитальный ремонт Overhaul	Коэффициент прочности/общий модуль упругости Strength factor/total modulus of elasticity	y = a + b(lgc - 1)

Табл. 2. Предельные значения критериев, определяющих необходимость управляющего воздействия на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги

Table 2. Limit values of criteria determining the need for control action at the operational stage of the road life cycle

Вид управляющего воздействия Type of control action	Показатель Indicator	Предельное значение Limit value
Содержание/замена слоев износа Maintenance/replacement of wear layers	Колея/износ Track/wear	h_k = 2 см / h_{tr} = 2 см
Ремонт Repair	Продольная ровность покрытия Longitudinal flatness of the pavement	IRI > 4 м/км / IRI > 4 m/km
Капитальный ремонт Overhaul	Коэффициент прочности/общий модуль упругости Strength factor/total modulus of elasticity	E_{\phi} < E_{min, tp} / E_{sf} < E_{min, el}

Табл. 3. Конструкция дорожной одежды на эксплуатируемом участке автомобильной дороги
Table 3. Pavement design on the operational section of the highway

Слой Layer	Толщина, см Thickness, cm	Проектное значение продольной ровности, м/км Design value of longitudinal flatness, m/km	Проектное значение модуля упругости на поверхности дорожной одежды, МПа Design value of elastic modulus on the pavement surface, MPa	Требуемое минимальное значение общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды, МПа Required minimum value of the total modulus of elasticity on the pavement surface, MPa
ЩМА-16 на БНД 70/100 SMA-16 on BND 70/100	5	1,7	593	477
A22Нт на БНД 70/100 A22Nt on BND 70/100	7			
A32От на БНД 70/100 A32From BND 70/100	10			
Щебень, уложенный по способу заклинки Crushed stone laid by the wedging method	32			
Мелкий песок Fine sand	35			
Тяжелый суглинок Heavy loam	—			

Из рис. 2 видно, что стандартная схема влияния управляющих воздействий в виде комплекса работ по содержанию, ремонту, капитальному ремонту, описываемая с использованием зависимостей (1)–(5)

на эксплуатационное состояние а. д., может быть представлена в виде графиков изменения поперечной ровности, продольной ровности, модулей упругости. Соответствие между данными показателями и видом

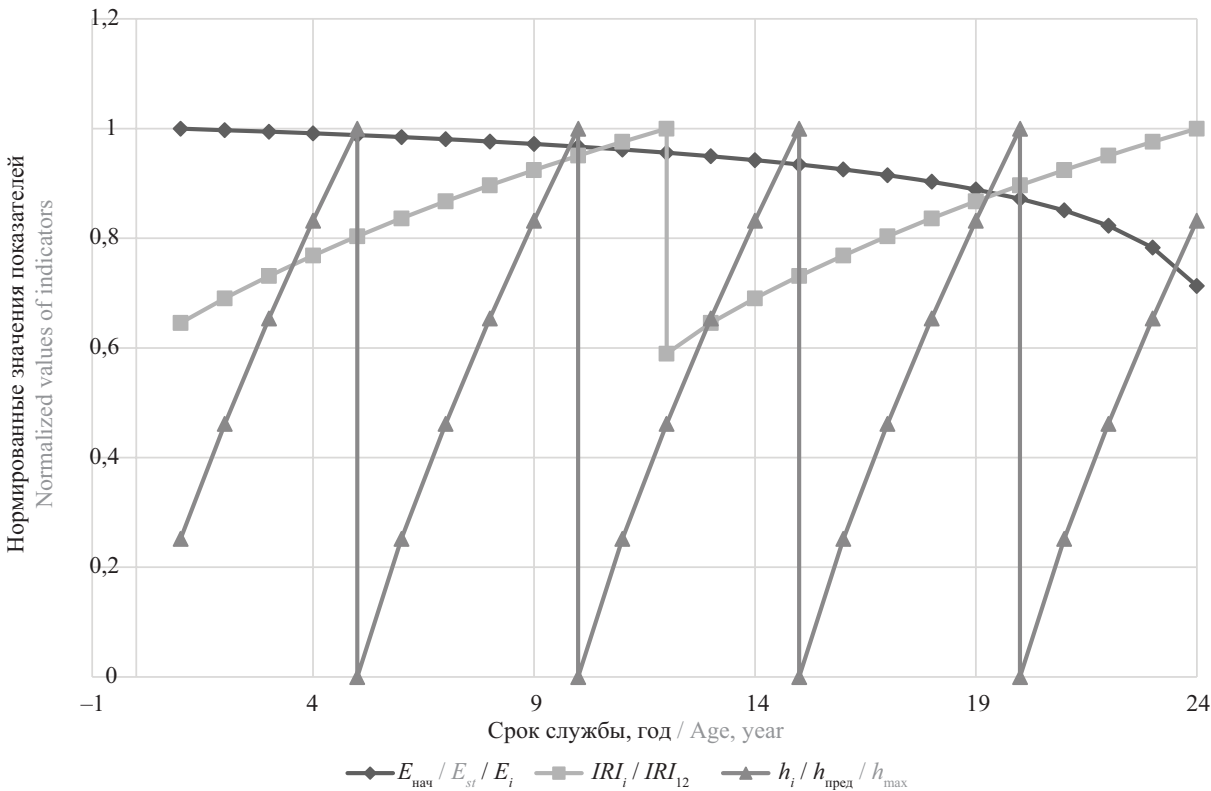


Рис. 2. Изменение основных показателей состояния дорожной одежды автомобильной дороги в течение эксплуатационной стадии жизненного цикла

Fig. 2. Changes in the main indicators of the road pavement condition during the operational stage of the life cycle

управляющих воздействий напрямую следует из Постановления Правительства и номенклатуры работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту на автомобильных дорогах. Поперечная ровность (колеиность) устраняется в рамках содержания путем фрезерования слоя износа, толщина которого составляет 2 см, с учетом запаса на предельно допустимую величину колесобразования. Полное восстановление продольной ровности покрытия выполняется в ходе работ по ремонту, срок которого установлен Постановлением Правительства, на 12-й год эксплуатации дороги. Полное восстановление всех эксплуатационных качеств дороги может быть проведено только в ходе капитального ремонта на 24-й год ее эксплуатации.

Очевидным недостатком представленного отображения следует считать независимость траекторий изменения продольной и поперечной ровности от изменения модуля упругости на поверхности дорожной одежды. Однако данный недостаток может быть сравнительно просто преодолен путем модификации уравнений (1), (2):

$$h_k = a \left(1,85 \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{i=1}^T N_p \right)^b \frac{E_{np,i}}{E_{np,нач}}; \tag{6}$$

$$IRI = \left(IRI_0 + a \sum_{i=1}^T N_p^b \right) \frac{E_{np,i}}{E_{нач}}. \tag{7}$$

В этом случае эксплуатационная стадия ЖЦ а. д. графически может быть приведена в следующем виде (рис. 3).

Как видно из графика (рис. 3), учет проектного снижения коэффициента прочности дорожной одежды отражается на прогнозных значениях фактической продольной и поперечной ровности покрытия, увеличивая фактические значения индекса продольной ровности IRI и абсолютные значения глубины колеи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетные результаты, представленные выше, показывают, что уже на этапе проектирования возможно осуществить прогнозирование изменения основных транспортно-эксплуатационных показателей ЖЦ. При этом важно понимать, что в рамках современной нормативной базы, жестко регламентирующей директивные межремонтные сроки на а. д. общего пользования, эксплуатационную стадию ЖЦ целесообразно рассматривать только с учетом планируемых работ по содержанию и ремонту. Следует отметить, что фактически единственным управляемым параметром на текущий момент являются работы по содержанию а. д., периодичность которых зависит от интенсивности движения. Учет снижения коэффициента прочности позволяет дифференциро-

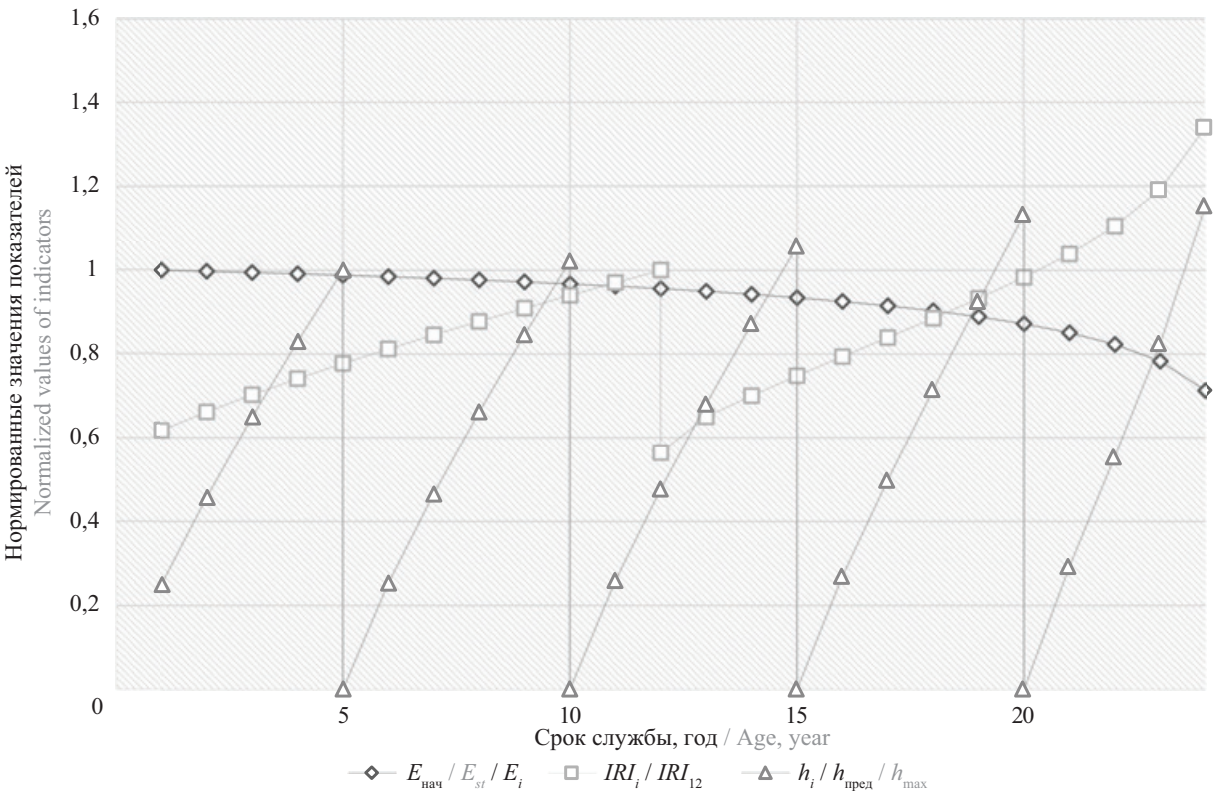


Рис. 3. Изменение основных показателей состояния дорожной одежды автомобильной дороги в течение эксплуатационной стадии жизненного цикла с учетом влияния снижения коэффициента прочности дорожной одежды

Fig. 3. Changes in the main indicators of the road pavement condition during the operational stage of the life cycle taking into account the influence of the reduction of the road pavement strength coefficient

Табл. 4. Конструкция дорожной одежды на эксплуатируемом участке автомобильной дороги

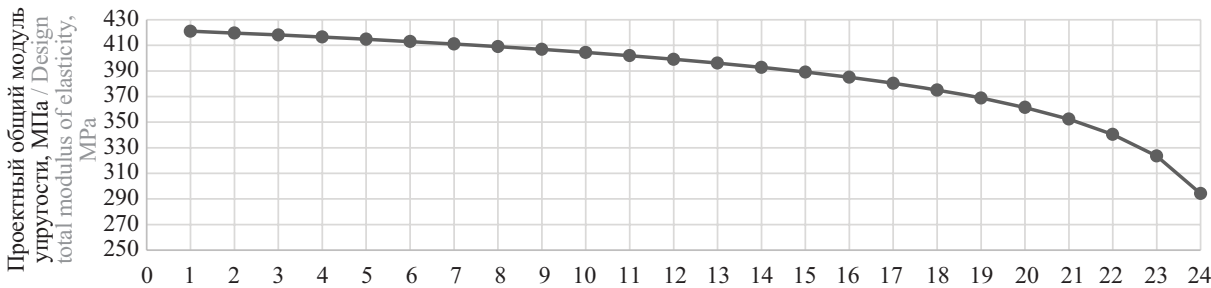
Table 4. Pavement design on the operational section of the highway

Слой Layer	Толщина, см Thickness, cm	Проектное значение продольной ровности, м/км Design value of longitudinal flatness, m/km	Проектное значение модуля упругости на поверхности дорожной одежды, МПа Design value of elastic modulus on the pavement surface, MPa	Требуемое минимальное значение общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды, МПа Required minimum value of the total modulus of elasticity on the pavement surface, MPa
ЩМА-16 на ПБВ SMA-16 on PBB	5	1,7	420	345
Асфальтобетон м/з на БНД 60/90 Asphalt concrete m/z on BND 60/90	7			
Асфальтобетон к/з на БНД 60/90 Asphalt concrete k/z on BND 60/90	8			
Щебень, уложенный по способу заклинки Crushed stone laid by the wedging method	20			
Щебень, уложенный по способу заклинки Crushed stone laid by the wedging method	43			
Тяжелый суглинок Heavy loam	—			

ванно подходить к их назначению, увеличивая сроки между заменой слоев износа на начальном этапе эксплуатации а. д., постепенно снижая их впоследствии из-за увеличения крутизны кривой колеиности (рис. 2). Формально периодическая замена слоев износа, безусловно, будет замедлять процессы деградации продольной ровности покрытия, хотя и не заменяя собой полноценную замену верхнего слоя асфальтобетона, но в значительной степени сглаживая неровности с малой длиной волны, что будет позитивно сказываться на абсолютных значениях индекса IRI. Однако на текущий момент данная статистика еще не накоплена и корректный учет влияния мероприятий по содержанию на величину продольной ровности практически не изучен. В качестве примера расчета абсолютных значений изменения основных эксплуатационных параметров рассмотрим участок а. д., законченный строительством в Ростовской области, с конструкцией, представленной в табл. 4.

С учетом зависимостей (2)–(7) проектные кривые изменения общего модуля упругости, продольной ровности покрытия и поперечной ровности будут иметь вид (рис. 4).

Как видно из представленных графиков (рис. 4), осуществление прогноза изменения основных эксплуатационных характеристик позволяет предположить, что для обеспечения нормативных требований достаточно проведения работ по ремонту покрытия а. д. на 16-й год эксплуатации (вместо 12-го года по нормативным срокам), а сроки выполнения работ по содержанию составляют 5 лет. Однако, учитывая, что снижение общего модуля упругости оказывает влияние на скорость накопления колеи, целесообразным вариантом является выполнение первой замены слоев износа на 5-й год эксплуатации, а остальные выполнять каждые 4 последующих года, не допуская превышения (пусть и незначительного) на 10-й, 15-й, 20-й годы эксплуатации.



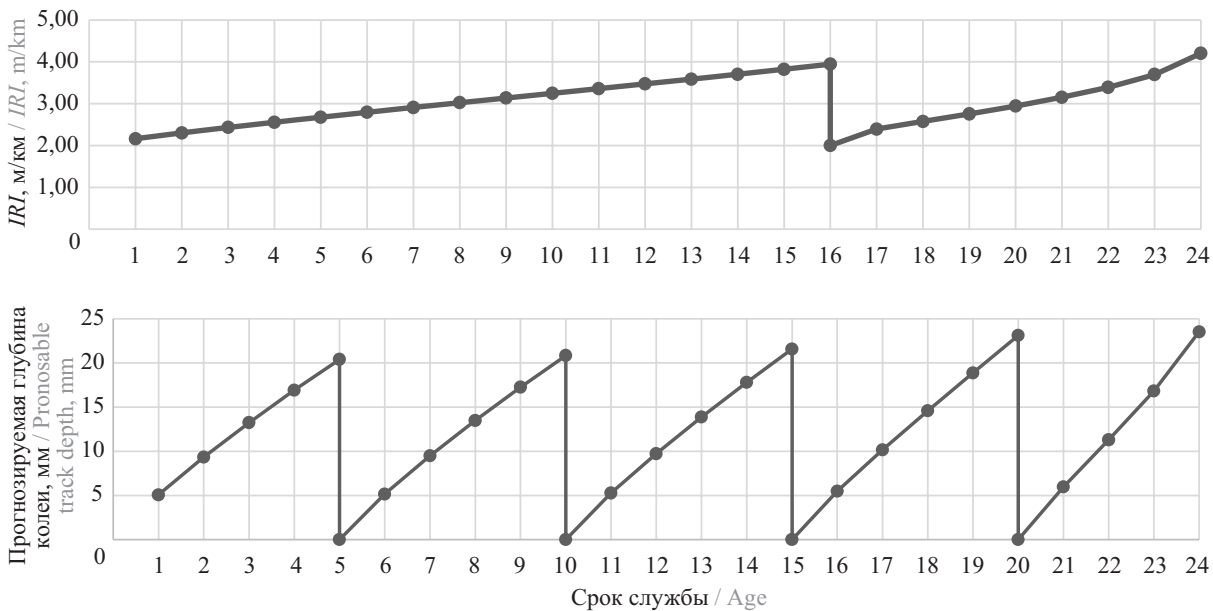


Рис. 4. Проектные кривые изменения общего модуля упругости, продольной ровности покрытия и поперечной ровности
Fig. 4. Design curves of total modulus of elasticity, longitudinal flatness of the pavement and transverse flatness

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в рамках проведенного исследования результаты дают возможность уже на этапе проектирования осуществить построение различных сценариев эксплуатационной стадии ЖЦ а. д. с учетом влияния на него управляющих воздействий в форме работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту автомобильной дороги. Следует отметить, что в соответствии с существующей парадигмой, требующей обязательного обеспечения срока службы между капитальными ремонтами в 24 года и между ремонтами в 12 лет, основной параметр периодичности которого можно изменять, являются работы по содержанию а. д. Вместе с тем перспективным для дальнейших исследований служит изучение влияния работ, выполняемых в рамках содержания (замена слоев износа), на увеличение интервала до ремонта и, как следствие, увеличения срока до момента выполнения капитального ремонта. Однако на текущий момент накопление данной информации только ведется, так как участки, эксплуатируемые

в соответствии со стратегией обеспечения 24-летних сроков службы а. д., начали строиться относительно недавно. В качестве основных результатов, полученных в данной статье, считаем необходимым выделить следующие:

- модифицирована зависимость для прогнозирования изменения общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды в течение ее срока службы, представляющая собой убывающую функцию общего модуля упругости от суммарного числа приложений расчетной нагрузки и соответственно времени эксплуатации;
- модифицированы зависимости для прогнозирования изменения фактической продольной ровности и колеиности путем введения дополнительного множителя, характеризующего общую потерю прочности на прогнозный год;
- с учетом модифицированных зависимостей построены сценарии эксплуатационной стадии ЖЦ для модельной конструкции дорожной одежды автодороги и реальной а. д., эксплуатирующейся в Ростовской области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сковцов А.В., Сарычев Д.С. Жизненный цикл проектов автомобильных дорог в контексте информационного моделирования // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 1 (4). С. 4–14. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.1. EDN TWONWT.
2. Максимычев О.И., Бойков В.Н. Поддержка жизненного цикла проектов дорожно-строительных работ в парадигме цифровой экономики // САПР

и ГИС автомобильных дорог. 2019. № 1 (12). С. 10–15. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.2. EDN CCFBRB.
3. Скоробогатов А.Р. Особенности жизненного цикла автомобильной дороги на стадии проектирования // Тенденции развития современной науки : сб. тр. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. 2023. С. 540–543. EDN YEFKGW.

4. Дингес Э.В., Морева Е.С. Проблемы и перспективы заключения контрактов жизненного цикла на строительство автомобильных дорог в России. М., 2020. 114 с. EDN QNJNTP.

5. Гребешок К.С. О необходимости совершенствования системы управления состоянием автомобильных дорог на основе реального остаточного ресурса дорожной одежды // Транспортное строительство. 2017. № 2. С. 4–6. EDN ZHBHYF.

6. Тиратуриян А.Н., Углова Е.В., Ляпин А.А. Энергетический метод определения остаточного ресурса нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 71–80. DOI: 10.31857/S0130308220100073. EDN POZNKA.

7. Углова Е.В., Конорев А.С. Планирование работ по ремонту и содержанию дорожных одежд на основе оценки их остаточного ресурса // Строительство-2015: Строительство. Дороги. Транспорт : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 30–32. EDN VARLNH.

8. Углова Е.В., Тиратуриян А.Н., Шамраев Л.Г. Современный подход к оценке транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог государственной компании «Российские автомобильные дороги» // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 1 (6). С. 38–51. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.7. EDN XAMXGZ.

9. Углова Е.В. Новый подход к назначению ремонтных мероприятий на эксплуатируемых автомобильных дорогах // Актуальные проблемы науки и техники. 2017 : мат. Национ. науч.-практ. конф. 2017. С. 297–299. EDN AVLOCH.

10. Углова Е.В., Тиратуриян А.Н., Асланян Г.В., Голубев К.В. Диагностика состояния автомобильной дороги М-4 «ДОН» на сетевом уровне // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 49 (68). С. 99–109. EDN ZGRUGP.

11. Elkins G.E., Rada G., Groeger J., Visintine B.A. Pavement remaining service interval implementation guidelines. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2013. No. FHWA-HRT-13-050.

12. Ekramnia T., Nasimifar M. Development of a methodological tool for treatment prioritization in net-

work-level pavement management system // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2022. Vol. 148. Issue 1. DOI: 10.1061/jpeodx.0000329

13. Hafez M., Ksaibati K., Atadero R. Pavement maintenance practices of low-volume roads and potential enhancement: the regional experience of Colorado pavement management system // International Journal of Pavement Engineering. 2021. Vol. 22. Issue 6. Pp. 718–731. DOI: 10.1080/10298436.2019.1643021

14. Geary G.M., Tsai Y. A 3D Slab-Based Methodology to predict end of life for concrete pavements // International Journal of Pavement Engineering. 2022. Vol. 23. Issue 14. Pp. 4966–4976. DOI: 10.1080/10298436.2021.1990286

15. Ram P.V. et al. Demonstrating the Application of Life Cycle Planning (LCP) on a Pavement Network: Results from the Arizona DOT Pavement Pilot Project. United States. Federal Highway Administration, 2021. No. FHWA-HIF-21-044.

16. Karimzadeh A., Shoghli O. Predictive analytics for roadway maintenance : a review of current models, challenges, and opportunities // Civil Engineering Journal. 2020. Vol. 6. Issue 3. Pp. 602–625. DOI: 10.28991/cej-2020-03091495

17. Ďurinová M., Mikolaj J., Hostačná V. Modeling of changes in pavement serviceability of the asphalt road // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 55. Pp. 1131–1138. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.083

18. Rydholm T.C., Luhr D.R. Modeling and Analyzing Budget-Constrained Pavement Preservation Strategies // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014. Vol. 2431. Issue 1. Pp. 6–15. DOI: 10.3141/2431-02

19. Ram P. et al. Remaining Service Interval : a White Paper. 2021. No. FHWA-HRT-21-006.

20. Baus R.L. et al. Mechanistic-empirical pavement design guide implementation. University of South Carolina. Dept. of Civil & Environmental Engineering, 2010. No. FHWA-SC-10-01.

21. Tarefder R., Ahmed M.U., Rahman M.M. Evaluating functional and structural condition based maintenances of airfield pavements // Civil Engineering Dimension. 2013. Vol. 15. Issue 2. Pp. 71–80. DOI: 10.9744/ced.15.2.71-80

Поступила в редакцию 15 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 января 2025 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Артем Николаевич Тиратуриян** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; ORCID: 0000-0001-5912-1235; tiraturjan@list.ru;

Андрей Викторович Воробьев — аспирант кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; ORCID: 0009-0006-2694-1337; andreyvorobyev19@mail.ru;

Чунь Ян — аспирант кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; ORCID: 0009-0000-5687-6202; YangChun24@outlook.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Skvortsov A.V., Sarychev D.S. Life cycle of highway projects in the context of information modeling. *CAD & GIS for roads*. 2015; 1(4):4-14. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.1. EDN TWONWT. (rus.).
2. Maximychev O.I., Boykov V.N. Lifecycle support of road construction in digital economics. *CAD & GIS for roads*. 2019; 1(12):10-15. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.2. EDN CCFBRB. (rus.).
3. Skorobogatov A. Features of the life cycle of a road at the design stage. *Trends in the development of modern science : collection of works of the scientific and practical conference of students and graduate students of Lipetsk State Technical University*. 2023; 540-543. EDN YEFKGW. (rus.).
4. Dinges E.V., Moreva E.S. *Problems and prospects of life cycle contracts for highway construction in Russia*. Moscow, 2020; 114. EDN QNJNTP. (rus.).
5. Grebeshok K.S. About the necessity of improvement of the roadways management system based on the real residual life of the pavement (the ending). *Transport Construction*. 2017; 2:4-6. EDN ZHBHYF. (rus.).
6. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A. An energy method for determining the residual resource of non-rigid road pavements at the stage of operation. *Defectoscopy*. 2020; 10:71-80. DOI: 10.31857/S0130308220100073. EDN POZNKA. (rus.).
7. Uglova E.V., Konorev A.S. Planning of works on repair and maintenance of road pavements on the basis of estimation of their residual resource. *Construction-2015: Construction. Roads. Transportation : materials of the International scientific and practical conference*. 2015; 30-32. EDN VARLNH. (rus.).
8. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shamraev L.G. Modern approach to the assessment of transportation and operational indicators of highways of the state company "Russian Highways". *CAD & GIS for roads*. 2016; 1(6):38-51. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.7. EDN XAMXGZ. (rus.).
9. Uglova E.V. New approach to the assignment of repair measures on exploited highways. *Actual problems of science and technology. 2017 : materials of the national scientific and practical conference*. 2017; 297-299. EDN AVLOCH. (rus.).
10. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Aslanyan G.V., Golubev K.V. Diagnostics of the state of M-4 "DON" highway on network level. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2017; 49(68):99-109. EDN ZGRUGP. (rus.).
11. Elkins G.E., Rada G., Groeger J., Visintine B.A. *Pavement remaining service interval implementation guidelines*. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2013; FHWA-HRT-13-050.
12. Ekramnia T., Nasimifar M. Development of a methodological tool for treatment prioritization in network-level pavement management system. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2022; 148(1). DOI: 10.1061/jpeodx.0000329
13. Hafez M., Ksaibati K., Atadero R. Pavement maintenance practices of low-volume roads and potential enhancement: the regional experience of Colorado pavement management system. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021; 22(6):718-731. DOI: 10.1080/10298436.2019.1643021
14. Geary G.M., Tsai Y. A 3D Slab-Based Methodology to predict end of life for concrete pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. 2022; 23(14):4966-4976. DOI: 10.1080/10298436.2021.1990286
15. Ram P.V. et al. *Demonstrating the Application of Life Cycle Planning (LCP) on a Pavement Network: Results from the Arizona DOT Pavement Pilot Project*. United States. Federal Highway Administration, 2021; FHWA-HIF-21-044.
16. Karimzadeh A., Shoghli O. Predictive analytics for roadway maintenance : a review of current models, challenges, and opportunities. *Civil Engineering Journal*. 2020; 6(3):602-625. DOI: 10.28991/cej-2020-03091495
17. Ďurinová M., Mikolaj J., Hostačná V. Modelling of changes in pavement serviceability of the asphalt road. *Transportation Research Procedia*. 2021; 55:1131-1138. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.083
18. Rydholm T.C., Luhr D.R. Modeling and Analyzing Budget-Constrained Pavement Preservation Strategies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2014; 2431(1):6-15. DOI: 10.3141/2431-02
19. Ram P. et al. *Remaining Service Interval : a White Paper*. 2021; FHWA-HRT-21-006.
20. Baus R.L. et al. *Mechanistic-empirical pavement design guide implementation*. University of South Carolina. Dept. of Civil & Environmental Engineering, 2010; FHWA-SC-10-01.
21. Tarefder R., Ahmed M.U., Rahman M.M. Evaluating functional and structural condition based maintenances of airfield pavements. *Civil Engineering Dimension*. 2013; 15(2):71-80. DOI: 10.9744/ced.15.2.71-80

Received May 15, 2024.

Adopted in revised form on January 27, 2025.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S: **Artem N. Tiraturyan** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automobile Roads; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5912-1235; tiraturjan@list.ru;

Andrey V. Vorobev — postgraduate student of the Department of Automobile Roads; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-2694-1337; andreyvorobyev19@mail.ru;

Chun Yang — postgraduate student of the Department of Automobile Roads; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; YangChun24@outlook.com.

*Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Возможности искусственного интеллекта и автоматизации
процессов проектирования в строительстве:
библиометрический анализ

Дмитрий Викторович Слепушкин¹, Дмитрий Юрьевич Бурлов²

¹ Московский инновационный университет; г. Москва, Россия;

² Московский финансово-промышленный университет «Синергия»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) в строительном секторе происходит неравномерно, однако потенциал машинного обучения и искусственного интеллекта (AI/ML-технологий) в этой сфере огромен. Цель исследования — выполнить библиометрический анализ научных публикаций о развитии технологий ИИ и автоматизации в строительном проектировании. Новизна исследования заключается в комплексном анализе трендов и динамики исследований ИИ в строительстве на основе обширной выборки научных публикаций. Практическая значимость состоит в выявлении перспективных направлений применения AI/ML-технологий для развития инноваций и оптимизации процессов в строительной отрасли.

Материалы и методы. Проанализировано 16 819 научных статей, опубликованных в период с 1955 по 2023 г., индексируемых на платформе OpenAlex. Выборка осуществлялась по поисковым запросам, связанным с ИИ в строительстве в целом, а также по отдельным направлениям: BIM-моделированию, генеративному проектированию и цифровым двойникам (ЦД). Использованы методы библиометрического анализа, статистического анализа, кластеризация исследований проведена с помощью VOSviewer 1.6.20.

Результаты. Исследования о применении возможностей ИИ в строительстве получили активный импульс к развитию после 2020 г. Направления ЦД и BIM-технологий только начинают рассматриваться с точки зрения возможностей AI/ML-технологий, генеративное проектирование развивается быстрее за счет более раннего старта исследований. Выявлены ключевые страны, университеты и тематические кластеры в каждом направлении.

Выводы. Результаты исследования показывают перспективные направления применения AI/ML-технологий в строительной сфере. Дальнейшие исследования ЦД, BIM-моделирования и генеративного проектирования могут способствовать развитию инноваций и улучшению процессов проектирования, строительства и управления объектами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственный интеллект, нейросети, автоматизация, строительство, проектирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Слепушкин Д.В., Бурлов Д.Ю. Возможности искусственного интеллекта и автоматизации процессов проектирования в строительстве: библиометрический анализ // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 440–455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Викторович Слепушкин, dv737@mail.ru.

Artificial intelligence and automation of design processes
in construction: a bibliometric analysis

Dmitrii V. Slepushkin¹, Dmitrii Yu. Burlov²

¹ Moscow Innovation University; Moscow, Russian Federation;

² Moscow Financial and Industrial University “Synergy”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of artificial intelligence technologies in the construction sector is uneven; however, but the potential of AI/ML technologies in this field is enormous. The aim of the research is to conduct a bibliometric analysis of scientific publications on the development of artificial intelligence and automation technologies in construction design. The novelty of the research lies in a comprehensive analysis of AI research trends and dynamics in construction based on an extensive specimen of scientific publications. The practical significance consists in identifying promising areas for the application of AI/ML technologies for the development of innovations and optimization of processes in the construction industry.

Materials and methods. 16,819 scientific papers published between 1955 and 2023, indexed on the OpenAlex platform, were analyzed. The specimen was selected based on search queries related to artificial intelligence in construction in general, as well as in specific areas: BIM modelling, generative design, and digital twins. Methods of bibliometric analysis and statistical analysis were used, and research clustering was performed using VOSviewer 1.6.20.

Results. Research on the application of artificial intelligence capabilities in construction received an active impetus for development after 2020. The areas of “digital twins” and BIM technologies are just beginning to be considered from the perspective of AI/ML technology capabilities, while generative design is developing faster due to an earlier start of research. Key countries, universities, and thematic clusters in each direction were identified.

Conclusions. The research results show promising areas for the application of AI/ML technologies in the construction field. Further research on “digital twins”, BIM modelling, and generative design can contribute to the development of innovations and the improvement of design, construction, and facility management processes.

KEYWORDS: artificial intelligence, neural networks, automation, construction, design

FOR CITATION: Slepushkin D.V., Burlov D.Yu. Artificial intelligence and automation of design processes in construction: a bibliometric analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):440-455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455 (rus.).

Corresponding author: Dmitrii V. Slepushkin, dv737@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие цифровизации повсеместно трансформирует экономические и социальные процессы, расширяя сферу охвата на ранее затрагиваемые аспекты и области научной и практической деятельности. Данная тенденция относится и к технически сложным отраслям — авиационной и космической промышленности, биотехнологиям, строительству и другим, где наблюдается постепенное внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и автоматизации процессов.

Искусственный интеллект рассматривается сегодня как стратегическое преимущество во всех сферах человеческой жизнедеятельности. Вместе с тем развитие его в различных секторах экономики происходит неравномерно и зависит от сложности бизнес-процессов, степени риска и необходимых затрат на проведение научно-исследовательских работ. Однако использование подобных технологий сопряжено с ростом потенциальных рисков разного рода, которые могут возникнуть вследствие ошибок или неверного применения технологий ИИ. Интеграция новых цифровых инструментов, нейросетей сопровождается не только практико-ориентированной деятельностью, но и расширением области научных исследований, формируя необходимый базис для принятия качественных решений и минимизируя возможные негативные последствия.

Цель настоящей научной статьи заключается в проведении библиометрического анализа исследований о применении технологий искусственного интеллекта в строительстве и потенциале их использования в проектировании.

Достижение поставленной цели возможно за счет последовательного решения следующих задач: осуществление теоретического обзора исследований в рамках рассматриваемой темы, формирование выборки научных статей для дальнейшего библиометрического анализа, библиометрический анализ, обобщение полученных результатов исследования.

Вопросы применения ИИ все чаще становятся объектом научных исследований в самых разных областях, одна из таких областей — строительство и строительное проектирование. По данным аналитического отчета компании McKinsey & Company строительная сфера являлась одной из наименее оцифрованных отраслей экономики, хотя отдельные виды деятельности в строительстве успешно приме-

няют нейросетевые технологии и расширяют сферу такого использования.

Современные исследования подтверждают, что внедрение элементов ИИ позитивно отражается на снижении издержек в строительстве, сокращении ошибок, позволяет решать наиболее остро стоящие в строительной отрасли проблемы — перерасходы денежных средств, материалов, нарушения сроков строительства [1, с. 137, 138; 2, с. 250]. Возможности машинного обучения и искусственного интеллекта (так называемые AI/ML-технологии) расширяют их применение в строительной индустрии, позволяя решать сложные задачи в процессе архитектурного проектирования, автоматизации производственных процессов, упрощая функционал в таких областях, как планирование строительства, управление рисками в строительных проектах, обеспечение процессов контроля качества, повышение безопасности при строительстве, документационное обеспечение строительных проектов [3, 4].

Ряд исследований отечественных и зарубежных ученых посвящены изучению комплексных изменений в строительной сфере под воздействием технологий искусственного интеллекта. М.Б. Караманянц приводит основные векторы внедрения ИИ в строительстве на современном этапе. Наиболее востребованные области:

- проектирование зданий и сооружений;
- обеспечение процессов контроля качества и мер безопасности, в том числе путем внедрения инструментария риск-анализа;
- автоматизация строительных работ;
- поддержка управленческих решений в строительстве и автоматизация менеджмента проектов;
- снижение затрат на маркетинг при продаже строительных объектов;
- автоматизация управления запасами и логистикой в строительстве [5, с. 142].

Проведенный анализ показывает, что наиболее быстроразвивающимися сферами применения AI/ML-технологии в строительстве является BIM-моделирование, технологии цифровых двойников (ЦД) объектов и обеспечение процессов в архитектурном проектировании (также в исследованиях употребляется термин «генеративное проектирование»).

Н.М. Комаров и В.Г. Жаров указывают, что технология BIM — аббревиатура от Building Information Modeling, т.е. представляет собой информационную

виртуальную модель здания, которая описывает его существенные параметры и взаимосвязи [6, с. 77]. Использование подобных моделей позволяет оптимизировать процессы управления и эксплуатации зданий за счет взаимно интегрированных технологий строительного проектирования и функционального моделирования, что фактически делает технологию BIM универсальной и возможной для использования любым участником процесса строительства и моделирования зданий [7, с. 190, 191]. Внедрение нейросетевых моделей и инструментария ИИ существенно расширяет возможности BIM-моделирования, при этом развитие происходит как на теоретическом уровне, так и на практическом, что за счет взаимной синергии полученных результатов позитивно отражается на эффективности реализации строительных проектов [8; 9, с. 212].

Второе направление, где повсеместно внедряются технологии ИИ, — генеративное проектирование. Область автоматизации архитектурного проектирования в большей степени исследована зарубежными авторами. Так, обзорная статья о применении ИИ в архитектуре позволяет определить передовые области, в которых технологии AI/ML наиболее востребованы [10]. Проанализирована информация, изложенная в 75 научных статьях, полученные результаты систематизированы по темам. Авторами настоящего исследования дополнительно выполнен семантический анализ полученных результатов, который позволил определить, что основная область применения ИИ сегодня — это дизайн (преимущественно дизайн фасадов, дизайн макетов зданий). В общей сложности использование новых технологий в дизайне описывается в 22,7 % проанализированных авторами статьях. Также технологии ИИ востребованы при моделировании зданий (16 % проанализированных научных статей) и создании цифровых макетов (11 % проанализированных научных статей).

Достаточно внимания уделяется развитию синтезированных направлений деятельности в строительстве, где происходит взаимная интеграция возможностей оцифровки строительных процессов — BIM-моделирование и формирование ЦД зданий, управление строительством (СЕМ) и архитектурное проектирование [11, 12].

Третьим направлением, в рамках которого проявляется значительный интерес к технологиям ИИ, является формирование цифровых двойников — «виртуальных копий физических объектов, действий или систем <...> виртуальные модели зданий и инфраструктурных проектов для отслеживания прогресса, выявления надвигающихся проблем и повышения эффективности» [13, с. 357]. Создание моделей ЦД служит логическим продолжением цифрового моделирования, такая концепция впервые была представлена в США в 2003 г., фактически расширив уже существовавшую на тот момент BIM-технологию [14, с. 59; 15].

Технология ЦД значительно совершенствуется за счет применения методов машинного обучения, получая возможность анализировать большие объемы данных (в том числе исторических) и использовать соответствующие алгоритмы ИИ для улучшения прогнозов. Ключевой момент в этом случае — аналитические возможности AI/ML, которые позволяют выявлять скрытые закономерности и взаимосвязи в данных, что, в свою очередь, повышает точность и надежность прогнозов, предоставляемых цифровым двойником [16]. Текущая практика применения ЦД показывает, что существует три уровня моделирования в зависимости от степени автоматизации процессов:

- цифровая модель (Digital model), где данные и информация об обеих системах (реальной и виртуальной) передаются и обновляются вручную в обоих направлениях. Например, инженеры могут вносить изменения в виртуальную модель на основе сведений из реальной системы и наоборот;
- цифровая тень (Digital shadow), здесь информационный поток автоматизирован в одном направлении — от физической системы к ее виртуальной версии. Например, данные с датчиков в реальном времени могут автоматически обновлять виртуальную модель, но для принятия решений или корректировки действий требуется вмешательство инженера;
- цифровой близнец (Digital twin) — полностью интегрированная система в двунаправленный автоматический поток данных между реальной системой и ее ЦД, где данные непрерывно синхронизируются в прямом и обратном направлении. Внедрение AI/ML-технологий наиболее эффективно и достоверно именно в моделях цифровых близнецов.

Несмотря на имеющиеся перспективы, внедрение технологий ИИ в строительную сферу сопряжено со значительным количеством рисков и ограничений. Н.В. Городнова указывает, что до сих пор значимым ограничением для развития AI/ML-технологий является банальная несовместимость используемых информационных систем для проектирования в строительстве, логистических процессов в строительных проектах и сбора данных [17, с. 92]. Кроме того, индивидуальность каждого отдельно взятого проекта в строительстве также существенно ограничивает возможности автоматизации процессов в части проектирования за счет необходимости учета индивидуальных характеристик зданий, параметров их оснований, специфики природно-климатических условий. Как следствие, объем инвестиционных затрат не только на внедрение таких систем, но и на их достройку снижает рентабельность строительных проектов, ограничивая возможности применения технологии ИИ.

К аналогичным выводам приходят Е.К. Терешко и И.А. Рудская, считающие, что именно отсутствие информационного программного обеспечения (продукта), позволяющего объединять всю поступающую

информацию из различных систем, обеспечивающих строительный процесс, а также синхронизировать его — основное «узкое место» для дальнейшего развития BIM-проектирования. Тормозящими факторами выступают отсутствие квалифицированного персонала, в компетенции которого входит владение соответствующим программным обеспечением, а также «устоявшаяся система строительного производства “заказчик – генподрядчик – субподрядчик 1 ... n – конечный исполнитель работ”» [18, с. 27].

В строительной сфере наблюдается определенное сопротивление применению технологий AI/ML, а также трехмерного моделирования с применением BIM-технологий, обусловленное «старением» кадрового состава и трудностями с адаптацией к новым технологиям. Одной из причин кадрового сопротивления является недостаточность обучения и подготовки персонала для работы с BIM-технологиями, которая становится источником непонимания преимуществ и возможностей, а также неполного использования потенциала технологии. Как следствие, несмотря на достаточное количество программных решений, онлайн-платформ, такие ресурсы часто не используются в соответствии с имеющимся у них потенциалом [19, с. 309, 310].

Исследователи Университета Западной Англии (University of West of England — UWE) выявили четыре группы факторов, которые рассматриваются как сдерживающие развитие технологий цифровизации и автоматизации в строительном проектировании, и проранжировали их в порядке влияния [20, 21]. Установлено, что преимущественно ограничителями выступают экономические факторы — со стороны подрядчика (в первую очередь) и со стороны клиента (во вторую очередь). При этом влияние экономических факторов и рентабельности проекта намного сильнее влияет на подрядчика — оценка степени влияния возрастает почти вдвое (с 15,05 % у клиента до 31,3 % у подрядчика). В данном случае сдерживающими факторами выступают изначально низкий уровень выделенного бюджета на НИОКР в строительной сфере, фрагментированный характер строительства, а также слабая поддержка инноваций со стороны государственного сектора. Со стороны клиента влияет преимущественно сокращение общего размера бюджета на реализацию проекта. Также исследователями выделяются группы технико-культурных факторов (сюда отнесены общее сопротивление изменениям, слабая подготовленность кадров к новым технологиям работы) и внешнеэкономические факторы (низкая окупаемость инвестиций и недостаточность спроса на новые технологии).

Австралийские исследователи провели национальное исследование о восприятии технологий ИИ в строительной сфере, что позволило определить типовые ограничения [22]. Стоит отметить, что в целом отношение к новым нейросетевым технологиям и AI/ML-инструментам в строительстве преимущественно

положительное, а перспективы рассматриваются общественностью в два раза чаще, чем возможные ограничения. Опасения главным образом вызваны безопасностью данных при их использовании, фактическим отсутствием возможностей для внедрения нейросетевых технологий, увеличением финансовых рисков строительного проекта, не соответствующих полученному результату.

Целесообразно обозначить потенциальные перспективы AI/ML-технологий в строительной сфере. И.Н. Горбова, Р.Р. Аванесова и М.М. Мусаев ориентируются в первую очередь на получение социально позитивного результата от внедрения новых технологий, который будет выражен в следующем:

- улучшение качества жизни и инфраструктуры;
- повышение уровня инноваций;
- технологическое развитие;
- рост экономики [23, с. 50].

Г.Г. Кашеварова сужает область исследований, рассматривая влияние на деятельность отдельно взятого инженера-строителя [24, с. 175]. С такой точки зрения внедрение технологий ИИ позволяет значительно упростить и снизить временные, трудовые и финансовые затраты в обеспечении надзорных процессов на строительных площадках, автоматизации обнаружения дефектов и расчета (перерасчета) потенциальных рисков проекта. Расширение возможностей ИИ в строительстве должно быть реализовано системно, не только с позиции отдельно взятого сотрудника, но и в рамках отдельно взятого бизнес-процесса или группы процессов [25, с. 205; 26; 27, с. 509].

Не менее важно изучение и совершенствование потенциальных возможностей расширения объема аналитической обработки данных (на основании поступающей информации), направленной на снижение уровня неопределенности при принятии решений. Необходимо экстраполировать возможности применения технологий ИИ не только на сферу практического применения, но и на область теоретическую — требуется актуализация образовательных программ в сфере строительства, предполагающая внедрение тренировочного процесса использования ИИ в инженерное образование (не только в рамках отдельных дисциплин, но и за счет расширения практико-ориентированного образования в уже существующих, традиционных предметах по ФГОС) [28, с. 92; 29, 30].

Таким образом, проведенный анализ показывает разносторонность проводимых исследований, которые посвящены как текущей практике применения ИИ в строительной индустрии, так и потенциальным перспективам. Представленное исследование направлено на выявление основных направлений изучения в рамках рассматриваемой темы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проанализировано 16 819 научных статей, опубликованных в период с 1955 по 2023 г. включительно и индексируемых на платформе научной литературы

с открытым API — OpenAlex. Выборка научных статей для анализа осуществлялась по поисковому запросу «artificial intelligence and the construction industry and automation and design», а также по отдельным исследовательским направлениям с запросами «artificial intelligence and BIM-modeling», «artificial intelligence and generative design in construction», «artificial intelligence and digital twins in construction» за аналогичный временной период.

Для проведения исследования по сформированной выборке использованы методы библиометрического анализа, статистического анализа, выполнена кластеризация исследований при помощи компьютерной программы VOSviewer 1.6.20.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количество научных публикаций по вопросам возможного применения или теоретического развития концепций ИИ с каждым годом становится все больше. В последние годы количество научных статей в рассматриваемой области растет в геометрической прогрессии, а потенциальный охват тем существенно расширяется.

Проведенный анализ открытого научного каталога OpenAlex показывает, что количество публикаций со словосочетанием «искусственный интеллект» (artificial intelligence) с 1800 г. по настоящее время составляет 919 тыс. единиц. Наибольшее количество исследований о возможностях ИИ проводится в сфере медицины, бизнеса и в поле этических вопросов (темы расположены в порядке убывания количества научных публикаций). Наибольшая доля исследований представлена в последние годы, в 2023 г. количество научных публикаций достигло 122 828 единиц или почти 13,4 % от всех публикаций за последние два столетия (к сравнению, количество публикаций в 1800 г. — 11 ед., а в 1900 — около двухсот).

За аналогичный период времени количество научных публикаций о развитии ИИ в строительстве составило всего 72 тыс. ед., т.е. каждая тринадцатая научная публикация освещает вопросы применимости ИИ к строительной сфере (запрос формировался по словосочетанию «artificial intelligence» и «construction industry»). По итогам 2023 г. количество научных публикаций достигло 9 тыс. ед., пиковое значение отмечено в 2022 г. — более 9,8 тыс. ед.

Заинтересованность в исследованиях об ИИ в строительной сфере в мировом сообществе сформировалась на несколько десятилетий позже начала стремительного развития исследований по данному вопросу (рис. 1).

Влияние технологий ИИ на возможности автоматизации в строительной сфере исследованы путем библиометрического анализа открытой базы данных Open Alex. На первом этапе была сформирована выборка по запросу, объединяющему искусственный интеллект, автоматизацию проектирования и строительную сферу («artificial intelligence and the construction industry and automation and design»). Объем выборки для анализа составил 16 819 ед.

По рассматриваемой теме публикации появляются только с 1950-х гг. и имеют следующую динамику (рис. 2).

Визуально представленный период возможно разделить на 4 этапа развития исследований в рассматриваемой области.

1. С 1955 по 1979 г. — этап формирования интереса к исследованиям о возможностях ИИ в автоматизации процессов строительства. На данном этапе количество публикаций крайне мало — в общей сложности опубликовано 212 исследований (1,3 % от общей выборки). В среднем ежегодно публикуется около 8 исследований, за исключением 1966 г., когда было опубликовано 84 научные статьи после публикации отчета Национальной комиссии по технологи-

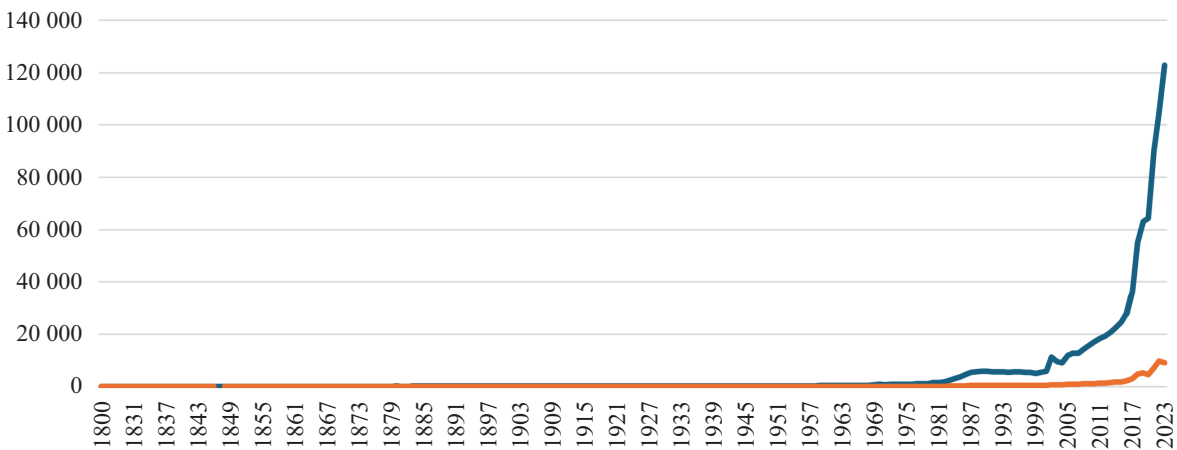


Рис. 1. Количество научных публикаций об использовании искусственного интеллекта в целом и в строительной отрасли в 1800–2023 гг., ед.

Fig. 1. The number of scientific publications on the use of artificial intelligence in general and in the construction industry in 1800–2023, units

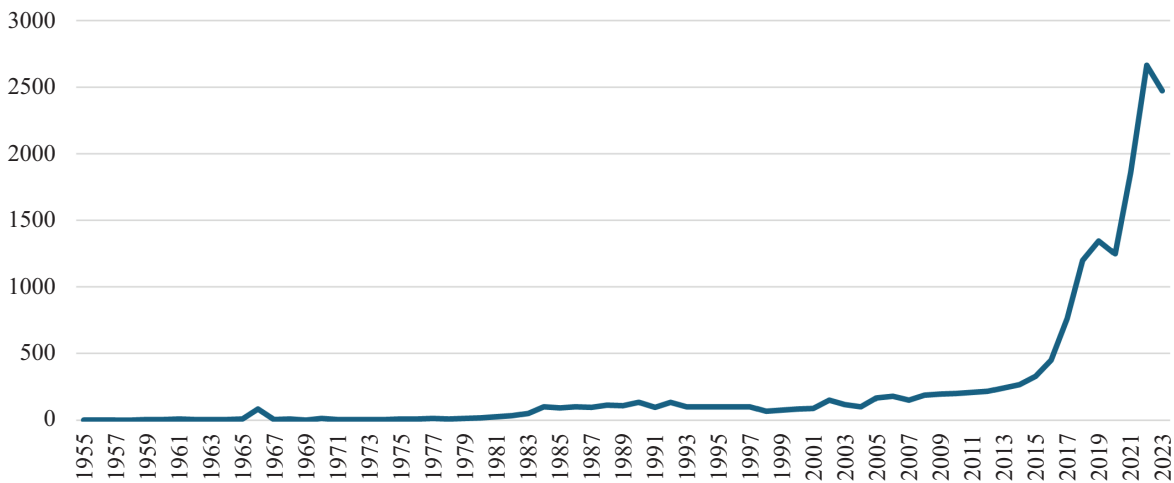


Рис. 2. Количество научных публикаций по рассматриваемой теме в 1955–2023 гг., ед.

Fig. 2. The number of scientific publications on the topic in 1955–2023, units

ям, автоматизации и экономическому прогрессу США о необходимости развивать сегмент автоматизации. В рассматриваемый период времени не наблюдается стабильного роста научных публикаций, однако за счет небольших количественных значений средний прирост показателя ежегодно составляет 82,2 %.

2. 1980–2007 гг. — период накопления потенциала научных исследований. В рассматриваемом периоде опубликовано 2759 исследовательских материалов (16,4 % от общей выборки). Для этого этапа характерно появление не только научных статей, но также отчетов, книг. В среднем ежегодно публикуется 99 исследований, а средний прирост публикаций год к году составляет только 13,3 %. Динамика публикационной активности неоднозначна, так как наблюдалось некоторое охлаждение интереса к теме в период с 1998 по 2001 г.

3. С 2008 по 2016 г. — фаза стабильного развития научной области, отмечается стабильный рост исследований, появляются научные диссертации. В этом периоде опубликовано 2291 исследований

(13,6 % от общей выборки), в среднем ежегодно публикуется 225 исследований, средний прирост показателя составляет 13,7 %.

4. 2017–2023 гг. — этап резкого развития научной области, который характеризуется существенным увеличением исследований. Всего за 7 лет опубликована основная масса всех научных исследований — 11 560 ед., что составляет 68,8 % от общей выборки. Несмотря на незначительное замедление публикационной активности в 2020 г. в связи с макроэкономическими шоками, средние показатели публикаций составляют 1650 ед. в год, средний прирост показателя количества публикаций год к году — 31,1 %. В 2022 г. наблюдается пиковое значение количества научных исследований — более 2,6 тыс. ед. Для данного этапа характерно не только количественное, но и качественное развитие рассматриваемой области исследования (табл. 1).

В рассматриваемых периодах наблюдается смещение от небольших, фрагментарных исследований в сторону фундаментальных научных трудов.

Табл. 1. Распределение публикаций по типу исследований

Table 1. Distribution of publications by type of research

Тип публикации Type of publication	Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period									
	1955–1979		1980–2007		2008–2016		2017–2023		Всего / In total	
	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%
Научная статья Scientific paper	206	97,2	2485	90,1	1885	82,3	8974	77,6	13 550	80,6
Глава в книге Chapter in the book	1	0,5	107	3,9	234	10,2	988	8,5	1330	7,9
Паратекст Paratext	0	0,0	15	0,5	30	1,3	512	4,4	557	3,3

Тип публикации Type of publication	Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period									
	1955–1979		1980–2007		2008–2016		2017–2023		Всего / In total	
	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%
Диссертация Dissertation	0	0,0	0	0,0	23	1,0	402	3,5	425	2,5
Книга Book	0	0,0	13	0,5	44	1,9	328	2,8	385	2,3
Отчет Report	5	2,4	110	4,0	24	1,0	237	2,1	376	2,2
Другие типы исследований Other types of research	0	0,0	29	1,1	51	2,2	116	1,0	196	1,2
Всего In total	212	100,0	2759	100,0	2291	100,0	11 560	100,0	16 819	100,0

Как можно наблюдать, количество диссертаций в абсолютных значениях начинает расти только с начала 2000-х гг. С конца 1980-х гг. также отмечается расширение типов исследований — публикуются книги, отчеты.

Среди стран лидерство по количеству публикаций удерживает США, однако общий анализ тенденций показывает, что в последний анализируемый период лидерские позиции перешли к Китаю. Традиционно перспективы изучения возможностей применения ИИ для автоматизации процессов в строительной сфере наблюдаются у трех стран — США, Китая и Великобритании. Одной из первых стран, активно развивавшихся в данном направлении, была Канада (период 1980–2007), которая затем снизила свою исследовательскую активность в этом направлении (табл. 2).

Стоит отметить, что Россия также входит в первую двадцатку стран, занимающихся исследованиями в рассматриваемой области, но в российских вузах широко не распространены подобные исследования. Наибольшее количество исследований опубликовано авторами Российской академии наук (отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН) в общем количестве 50 ед. Также в данном направлении проводится исследовательская деятельность учеными Уральского федерального университета, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Московского государственного строительного университета. Однако эти исследования преимущественно затрагивают вопросы развития энергетических и энергоснабженческих систем при строительстве, либо являются узкоспециализированными (например, научные ста-

Табл. 2. Распределение публикаций по странам

Table 2. Distribution of publications by country

Страна Country	Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period									
	1955–1979		1980–2007		2008–2016		2017–2023		Всего / In total	
	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%
США USA	97	45,8	902	32,7	371	16,2	1277	11,0	2647	15,7
Китай China	0	0,0	91	3,3	340	14,8	1733	15,0	2164	12,9
Великобритания Great Britain	8	3,8	281	10,2	191	8,3	954	8,3	1434	8,5
Германия Germany	1	0,5	81	2,9	118	5,2	628	5,4	828	4,9

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Страна Country	Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period									
	1955–1979		1980–2007		2008–2016		2017–2023		Всего / In total	
	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%
Индия India	1	0,5	42	1,5	91	4,0	496	4,3	630	3,7
Италия Italy	0	0,0	35	1,3	67	2,9	492	4,3	594	3,5
Канада Canada	1	0,5	114	4,1	67	2,9	372	3,2	554	3,3
Австралия Australia	0	0,0	85	3,1	72	3,1	385	3,3	542	3,2
Франция France	0	0,0	98	3,6	90	3,9	322	2,8	510	3,0
Испания Spain	0	0,0	35	1,3	93	4,1	359	3,1	487	2,9
Бразилия Brazil	0	0,0	20	0,7	64	2,8	322	2,8	406	2,4
Россия Russia	3	1,4	15	0,5	55	2,4	320	2,8	393	2,3
Другие Other	101	47,6	960	34,8	672	29,3	3900	33,7	5630	33,5
Всего In total	212	100,0	2759	100,0	2291	100,0	11 560	100,0	16 819	100,0

твы о выявлении дефектов в строительстве при помощи метода кластеризации, автоматизация подготовки ремонтной документации, применение интеллектуальных систем в строительном управлении и т.д.).

Также выполнен анализ распределения публикаций по сферам исследования (табл. 3).

Из приведенной информации видно, что представители научной сферы преимущественно проводят исследования в области промышленного инжиниринга, однако, с начала 2000-х гг. возрастает интерес к применению технологий ИИ при строительстве зданий и сооружений и в гражданском строительстве — по-

Табл. 3. Распределение публикаций по сфере исследования

Table 3. Distribution of publications by field of research

Тип публикации Type of publication	Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period									
	1955–1979		1980–2007		2008–2016		2017–2023		Всего In total	
	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%
Промышленный инжиниринг Industrial engineering	8	3,8	308	11,2	216	9,4	1160	10,0	1692	10,1
Строительство зданий и сооружений Construction of buildings and structures	1	0,5	118	4,3	101	4,4	630	5,4	850	5,1

Тип публикации Type of publication	Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period									
	1955–1979		1980–2007		2008–2016		2017–2023		Всего In total	
	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%	Абсолютное значение Absolute value	%
Проектирование систем управления Design of control systems	5	2,4	185	6,7	205	8,9	339	2,9	734	4,4
Электротехника и электроника Electrical and Electronics Engineering	1	0,5	66	2,4	101	4,4	398	3,4	566	3,4
Машиностроение Mechanical engineering	2	0,9	143	5,2	114	5,0	261	2,3	520	3,1
Гражданское строительство Civil engineering	0	0,0	20	0,7	16	0,7	129	1,1	165	1,0
Архитектура Architecture	1	0,5	15	0,5	14	0,6	60	0,5	90	0,5
Другие Other	194	91,5	1904	69,0	1524	66,5	8583	74,2	12 202	72,5
Всего In total	212	100,0	2759	100,0	2291	100,0	11 560	100,0	16 819	100,0

казатель удельного веса по рассматриваемым этапам стабильно возрастает. Снизилась востребованность в научных исследованиях по направлению «проектирование систем управления», «электротехника и электроника», «машиностроение» и «архитектура». Количество исследований по этим направлениям растет медленнее, что обуславливает снижение удельного веса таких научных публикаций. Отметим, что большая часть научных статей опубликована на английском языке (более 96 %), но данные нельзя рассматривать как показательные. На втором месте по количеству

расположены исследования, опубликованные на русском языке с удельным весом 0,6 %.

Более показательна статистика по анализу отдельных направлений исследований (табл. 4).

Направление генеративного проектирования начало развиваться раньше остальных, что обусловило большую проработанность в научных исследованиях. Анализ публикационной активности по направлениям представлен на рис. 3.

Как можно видеть, генеративное проектирование получило более активное развитие еще в начале

Табл. 4. Анализ научных публикаций и их периодизации по отдельным направлениям исследований

Table 4. Analysis of scientific publications and their periodization in certain areas of research

Направление исследований в строительстве The direction of research in construction	Количество опубликованных исследований Number of published studies	В том числе опубликованные в анализируемый период с 1955 по 2023 г. Including those published in the analyzed period from 1955 to 2023	Общий охватываемый период публикации, гг. The total period of publication covered, years
Применение технологии цифровой двойник Application of the digital twin	5485	5392	1857–2024
BIM-моделирование BIM modelling technology	3716	3653	1860–2024
Генеративное проектирование Generative design	9425	9240	1827–2024

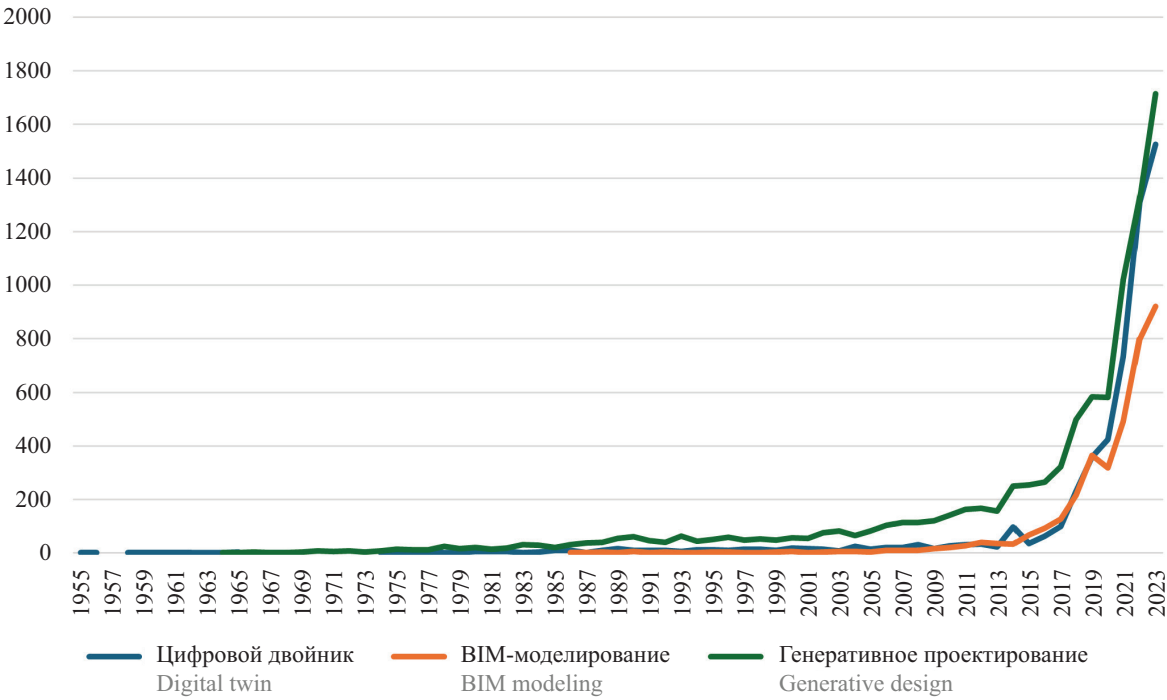


Рис. 3. Публикационная активность по направлениям исследований в 1955–2023 гг., ед.

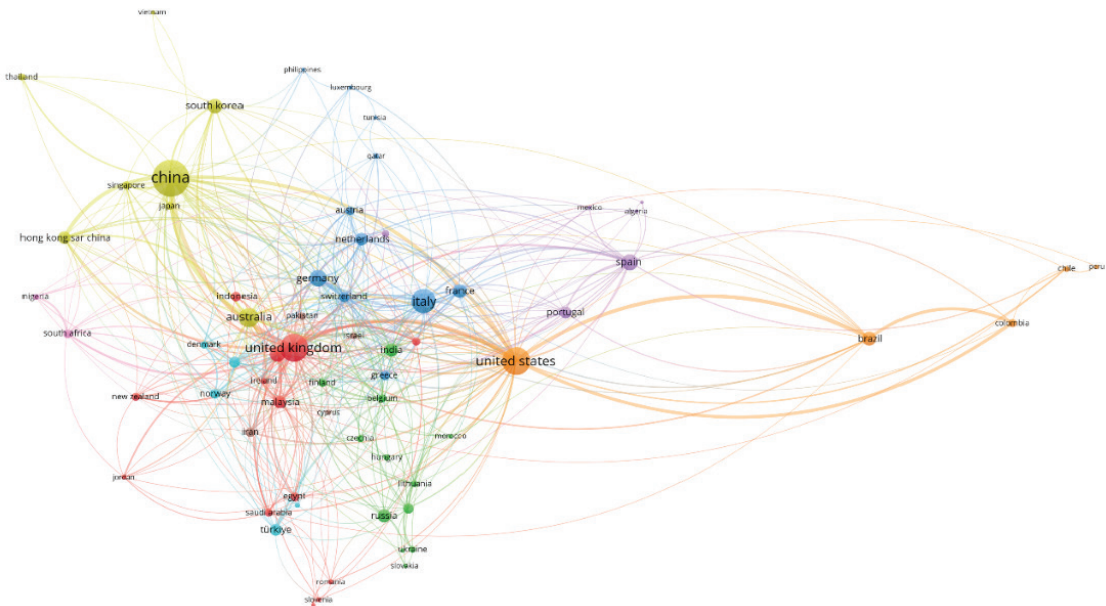
Fig. 3. Publication activity in research areas in 1955–2023, units

1990-х гг., в то время как остальные цифровые двойники и BIM-моделирования стали объектами активного исследования только ближе к 2010 гг.

Также следует отметить, что направления генеративное проектирование и цифровой двойник преимущественно изучаются следующими университетами: Лондонский университет (192 и 81 публикация соответственно), Калифорнийский университет (190 и 67 публикация соответственно), Китайская академия наук (116 и 54 публикации соответственно). Направ-

ление BIM-моделирования в основном исследуется в университетах Италии — Миланский политехнический университет (71 публикация, также активно проводит исследования по разработке цифровых двойников — 57 публикаций), Сапиенца — Римский университет (56 публикаций), Туринский политехнический университет (42 публикации).

При помощи программы VOSviewer были построены кластерные карты взаимодействия по странам, которые показывают, что в области BIM-



a

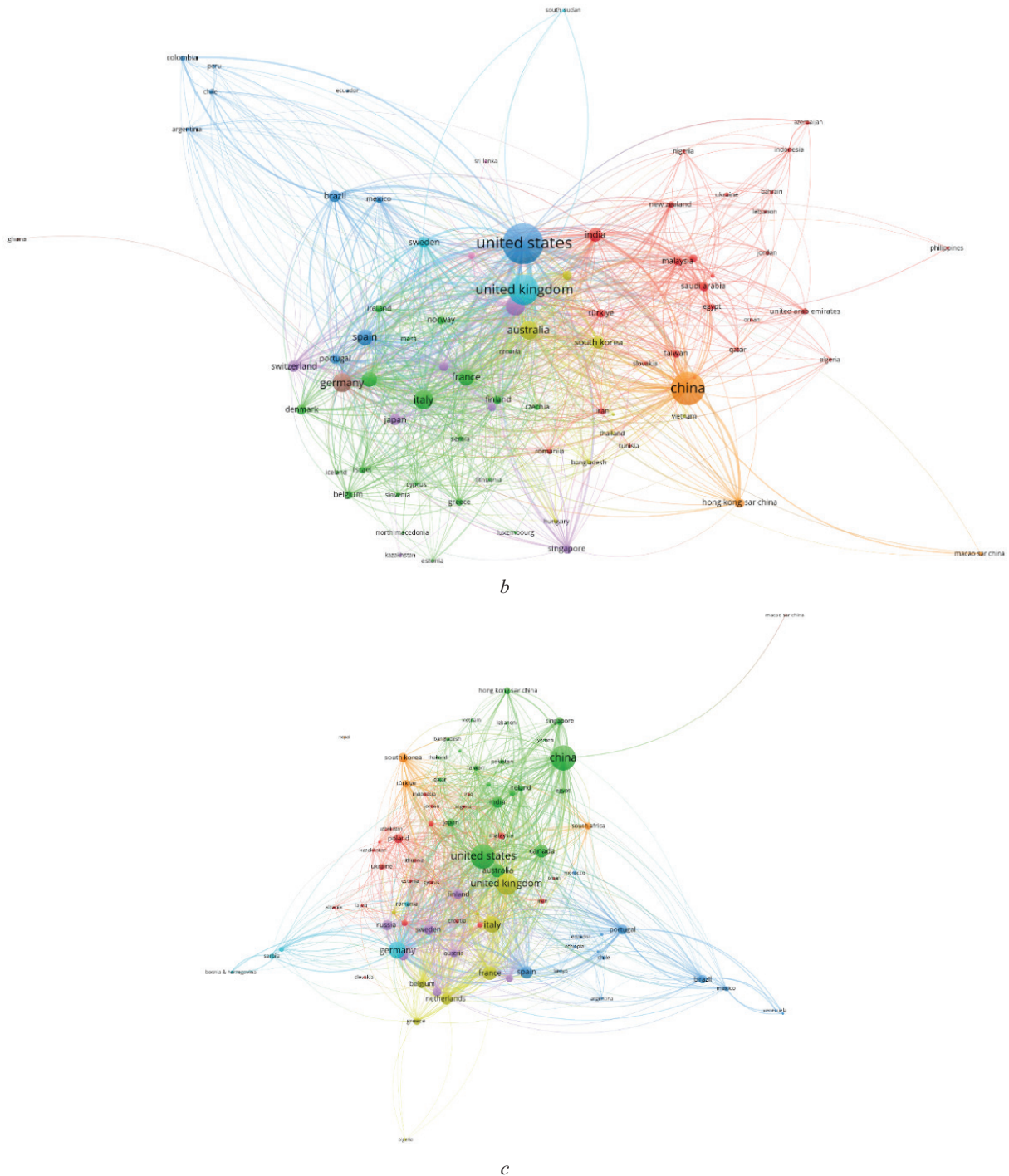


Рис. 4. Кластерная карта научного сотрудничества по исследованию применения искусственного интеллекта: *a* — в BIM-моделировании; *b* — в генеративном проектировании; *c* — в области разработки цифровых двойников
Fig. 4. Cluster map of scientific cooperation on the study of the use of artificial intelligence: *a* — in BIM modelling; *b* — in generative design; *c* — in the development of digital twins

моделирования основными кластерами научных исследований являются Великобритания, которая имеет широкое межстрановое взаимодействие, Китай, а также США. Россия в данной области сотрудничает преимущественно с Китаем, США, Канадой, Италией, Египтом, Индией, Нидерландами, Казахстаном (рис. 4).

В области генеративного проектирования сотрудничество более развито, а взаимосвязи между исследователями различных стран более обширны. Аналогично можно выделить три крупных кластера — США, Великобританию и Китай, а также три меньших кластера — Германию, Канаду и Австралию (рис. 4, *b*).

Табл. 5. Сводные результаты направлений исследований по итогам кластерного анализа по ключевым словам
Table 5. Summary results of research directions based on the results of cluster analysis by keywords

Направление исследований в строительстве The direction of research in construction	Подтемы в обозначенных направлениях исследований Subtopics in the designated areas of research	Четкость кластеров Cluster clarity
Применение технологии цифровой двойник Application of the digital twin	Применение компьютерных наук в инжиниринге, социальное восприятие технологий, экономическая эффективность технологии Application of computer science in engineering, social perception of technology, economic efficiency of technology	Средняя Average
BIM-моделирование BIM modelling technology	Применимость в различных областях инженерного дела (архитектура, строительство, электрика, сфера городского строительства и т.д.), формирование баз данных и управление ими, экологическое воздействие Applicability in various fields of engineering (architecture, construction, electrics, urban construction, etc.), database generation and management, environmental impact	Средняя Average
Генеративное проектирование Generative design	Возможности применения машинного обучения и глубокого обучения, текущее применение в строительной сфере, влияние на экономические показатели, влияние на общественность The possibilities of applying machine learning and deep learning, current applications in the construction sector, impact on economic indicators, impact on the public	Высокая High

В России исследования в данном направлении развиты в меньшей степени, а основными направлениями межгосударственного сотрудничества являются научные исследования с обозначенными выше крупными исследователями, а также с Японией, Италией, Францией, Южной Кореей, Сингапуром, Индией и некоторыми другими.

В сфере создания ЦД кластеризация по основным странам сохраняется неизменной, однако количество научных публикаций российских исследователей более заметно (рис. 4, с).

Исследования в РФ осуществляются преимущественно совместно со специалистами таких стран, как США, Китай, Великобритания, Германия, Италия, Франция, Нидерланды, Южная Корея, Испания, Португалия, Индия и др.

По каждому из направлений также выполнен кластерный анализ и выявлены ключевые направления исследований по каждой из тем на основании ключевых слов (параметры — type of analysis «Co-occurrence», unit of analysis «Concepts»), которые представлены в табл. 5.

Анализ данных позволяет сделать вывод о характере и структуре исследований в области строительства в рамках трех выявленных направлений. Как можно видеть, все представленные направления держат в фокусе инновации в строительстве, поскольку одно из значимых направлений исследования — применение современных технологических подходов для улучшения процессов проектирования и управления в строительстве. Также особое внимание уделяется вопросу эффективности использования новых технологий и их восприятию (одобрению или неодобрению) со стороны общественности. Целесообразно предположить, что оценка новых технологий со сторо-

ны общественности связана с потенциальными рисками использования AI/ML-технологий. Генеративное проектирование выделяется среди трех направлений как наиболее четкое и однородное, в то время как применение технологии ЦД и BIM-моделирование имеют среднюю степень четкости кластеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ современных научных публикаций показал явную тенденцию к увеличению исследований о возможностях ИИ в строительной сфере. Несмотря на то, что строительство является одной из наименее оцифрованных областей, с 2017 г. наблюдается устойчивый тренд на необходимость развития возможностей цифровой экономики в строительстве. Наиболее востребованными в настоящий момент выступают исследования о необходимости внедрения технологий в такие разработки, как цифровой двойник, BIM-моделирование и генеративное проектирование. Потенциально исследователи находятся в поиске способов снижения затрат на строительство, минимизации рисков в строительных проектах и повышения качества менеджмента. Более развитая из рассматриваемых направлений исследований — область генеративного проектирования, в то время как технология ЦД и BIM-моделирование находятся на ранней стадии исследований и характеризуются нечеткостью кластеров по ключевым направлениям исследований. Следовательно, данные вопросы рассматриваются исследователями с различных сторон, чтобы получить более полное понимание их потенциала и применимости в строительной отрасли. Дальнейшие исследования в этих областях могут способствовать развитию инноваций и улучшению процессов проектирования, строительства и управления объектами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Газаров А.Р. Преимущества использования искусственного интеллекта в сфере строительства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 136–139. EDN DZQOPN.
2. Колчин В.Н. Специфика применения технологий «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 250–253. EDN JJLECU.
3. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications // Automation in Construction. 2022. Vol. 141. P. 104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440
4. Rafsanjani H.N., Nabizadeh A.H. Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture, engineering, and construction (AEC) industry // Computers in Human Behavior Reports. 2023. Vol. 11. P. 100319. DOI: 10.1016/j.chbr.2023.100319
5. Караманянц М.Б. Изменения строительной отрасли при активном внедрении технологии с применением искусственного интеллекта (ИИ) // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 141–145. EDN SBRLCQ.
6. Комаров Н.М., Жаров В.Г. Управление инженерными системами интеллектуального здания с использованием технологий информационного и инфографического моделирования // Сервис plus. 2013. № 2. С. 74–81. EDN QAXENX.
7. Волков А.А., Батов Е.И. Системотехника функционального моделирования интеллектуальных зданий // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 188–193. EDN UMUGLZ.
8. Каширинур М.М., Николюк В.А. Возможности искусственного интеллекта в строительной индустрии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 1. С. 163–178. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178. EDN KRQYWZ.
9. Плешко М.С., Пошев А.У.Б. Модернизация методов решения прикладных задач в строительстве с применением BIM-технологий // Инновации и инвестиции. 2021. № 5. С. 209–212. EDN DZLGSI.
10. Pena M.L.C., Carballal A., Rodríguez-Fernández N., Santos I., Romero J. Artificial intelligence applied to conceptual design : a review of its use in architecture // Automation in Construction. 2021. Vol. 124. P. 103550. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103550
11. Pan Y., Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management : a critical review and future trends // Automation in Construction. 2021. Vol. 122. Pp. 103517. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517
12. Urbieto M., Urbieto M., Laborde T., Villarreal G., Rossi G. Generating BIM model from structural and architectural plans using Artificial Intelligence // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 78. P. 107672. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107672
13. Шананин В.А., Лосев К.Ю. Создание цифровых двойников в строительстве при помощи искусственного интеллекта // Инновации и инвестиции. 2023. № 6. С. 357–360. EDN NXXOJC.
14. Алтынцев М.А., Капник П.А. Создание метрической имитационной модели «цифрового двойника» активным методом дистанционного зондирования земли // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25. № 4. С. 58–67. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-58-67. EDN VZKWTI.
15. Delgado J.M.D., Oyedele L. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing // Advanced Engineering Informatics. 2021. Vol. 49. P. 101332. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101332
16. Kreuzer T., Papapetrou P., Zdravkovic J. Artificial intelligence in digital twins – a systematic literature review // Data & Knowledge Engineering. 2024. Vol. 151. P. 102304. DOI: 10.1016/j.datak.2024.102304
17. Городнова Н.В. Применение искусственного интеллекта и нанотехнологий в инвестиционно-строительной сфере России // Вестник НГУЭУ. 2021. № 3. С. 81–95. DOI: 10.34020/2073-6495-2021-3-081-095. EDN KWCGFR.
18. Терешко Е.К., Рудская И.А. Цифровой потенциал строительного комплекса: понятие, сущность и проблемы развития // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2020. Т. 13. № 3. С. 27–40. DOI: 10.18721/JE.13302. EDN QNGQIV.
19. Young D., Panthi K., Noor O. Challenges involved in adopting BIM on the construction jobsite // EPI Series in Built Environment. 2021. DOI: 10.29007/f8r3
20. Abioye S.O., Oyedele L.O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J.M.D., Bilal M. et al. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. P. 103299. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103299
21. Delgado J.M.D., Oyedele L., Ajayi A., Akanbi L., Akinade O., Bilal M. et al. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 26. P. 100868. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100868
22. Regona M., Yigitcanlar T., Xia B., Li R.Y.M. Artificial intelligent technologies for the construction industry: how are they perceived and utilized in Australia? //

Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2022. Vol. 8. Issue 1. P. 16. DOI: 10.3390/joitmc8010016

23. Горбова И.Н., Аванесова Р.Р., Мусаев М.М. Цифровая трансформация строительной отрасли России // Вестник Академии знаний. 2023. № 2 (55). С. 46–51. EDN EDFXIZ.

24. Кашеварава Г.Г. «Искусственный интеллект», или «логические рассуждения и разумные решения» в технической диагностике объектов строительства // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 4. С. 166–180. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-166-180. EDN SYDNNW.

25. Чудаева А.А., Барышев Д.В. Инкорпорация цифровых технологий в строительство: текущая ситуация и перспективы // Теория и практика общественного развития. 2023. № 6 (182). С. 198–205. DOI: 10.24158/tipor.2023.6.25. EDN SXCDXC.

26. Hunde B.R., Woldeyohannes A.D. Future prospects of computer-aided design (CAD) : a review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended

reality, and 3D printing // Results in Engineering. 2022. Vol. 14. P. 100478. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100478

27. Oluleye B.I., Chan D.W., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review // Sustainable Production and Consumption. 2023. Vol. 35. Pp. 509–524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002

28. Лёвин Б.А., Пискунов А.А., Поляков В.Ю., Савин А.В. Искусственный интеллект в инженерном образовании // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 7. С. 79–95. DOI: 10.31992/0869-3617-2022-31-7-79-95. EDN KCNAPI.

29. Hanafy N.O. Artificial intelligence's effects on design process creativity: “A study on used A.I. Text-to-Image in architecture” // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 80. P. 107999. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107999

30. Ko J., Ennemoser B., Yoo W., Yan W., Clayton M.J. Architectural spatial layout planning using artificial intelligence // Automation in Construction. 2023. Vol. 154. P. 105019. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105019

Поступила в редакцию 20 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 1 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 14 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Викторович Слепушкин — аспирант; Московский инновационный университет; 107564, г. Москва, ул. Краснобогатая, д. 10; SPIN-код: 4234-0485, РИНЦ ID: 1260200; dv737@mail.ru;

Дмитрий Юрьевич Бурлов — кандидат экономических наук, доцент; Московский финансово-промышленный университет «Синергия»; 125315, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 80 Б; SPIN-код: 3365-5590, РИНЦ ID: 282537, ORCID: 0009-0008-5269-635; budim2022@yandex.ru.

Вклад авторов:

Слепушкин Д.В. — идея, сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Бурлов Д.Ю. — научное руководство, концепция исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gazarov A.R. Advantages of using artificial intelligence in the field of construction. *Izvestiya Tula State University*. 2020; 4:136-139. EDN DZQOPN. (rus.).

2. Kolchin V.N. The specifics of the use of “Artificial intelligence” technology in construction. *Innovation & Investment*. 2022; 3:250-253. EDN JJLECU. (rus.).

3. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*. 2022; 141:104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440

4. Rafsanjani H.N., Nabizadeh A.H. Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture, engineering, and construction (AEC) industry. *Computers in Human Behavior Reports*. 2023; 11:100319. DOI: 10.1016/j.chbr.2023.100319

5. Karamanyants M.B. Changes in the construction industry with the active implementation of technology using artificial intelligence (AI). *Economy of Construction*. 2023; 9:141-145. EDN SBRLCQ. (rus.).

6. Komarov N.M., Zharov V.G. Management of engineering systems of an intelligent building using information and infographic modeling technologies. *Service Plus*. 2013; 2:74-81. EDN QAXENX. (rus.).

7. Volkov A.A., Batov E.I. System Engineering of Functional Modeling of Intelligent Buildings. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 10:188-193. EDN UUGLZ. (rus.).

8. Kashiripoor M.M., Nikolyyuk V.A. Artificial intelligence in construction industry. *Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26(1):163-178. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178. EDN KRQYWZ. (rus.).

9. Pleshko M.S., Poshev A.U.B. Modernization of methods for solving applied problems in construction with the use of BIM technologies. *Innovation & Investment*. 2021; 5:209-212. EDN DZLGSJ. (rus.).

10. Pena M.L.C., Carballal A., Rodríguez-Fernández N., Santos I., Romero J. Artificial intelligence applied to conceptual design : a review of its use in architecture. *Automation in Construction*. 2021; 124:103550. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103550

11. Pan Y., Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management : a critical review and future trends. *Automation in Construction*. 2021; 122:103517. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517

12. Urbietta M., Urbietta M., Laborde T., Villarreal G., Rossi G. Generating BIM model from structural and architectural plans using Artificial Intelligence. *Journal of Building Engineering*. 2023; 78:107672. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107672

13. Shananin V.A., Losev K.Yu. Creating digital doubles in construction using artificial intelligence. *Innovation & Investment*. 2023; 6:357-360. EDN NXXOJC. (rus.).

14. Altyntsev M.A., Karpik P.A. Creating metric simulated model of a “Digital twin” by the active earth remote sensing method. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2020; 25(4):58-67. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-58-67. EDN VZKWTI. (rus.).

15. Delgado J.M.D., Oyedele L. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*. 2021; 49:101332. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101332

16. Kreuzer T., Papapetrou P., Zdravkovic J. Artificial intelligence in digital twins : a systematic literature review. *Data & Knowledge Engineering*. 2024; 151:102304. DOI: 10.1016/j.datak.2024.102304

17. Gorodnova N.V. Application of artificial intelligence and nanotechnology in the investment and construction sector in Russia. *Vestnik NSUEM*. 2021; 3:81-95. DOI: 10.34020/2073-6495-2021-3-081-095. EDN KWCGFR. (rus.).

18. Tereshko E.K., Rudskaia I.A. Digital potential of the construction complex: concept, essence and problems of development. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2020; 13(3):27-40. DOI: 10.18721/JE.13302. EDN QNGQIV. (rus.).

19. Young D., Panthi K., Noor O. Challenges involved in adopting BIM on the construction jobsite. *EPiC Series in Built Environment*. 2021. DOI: 10.29007/f8r3

20. Abioye S.O., Oyedele L.O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J.M.D., Bilal M. et al. Artificial intelligence

in the construction industry : a review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44:103299. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103299

21. Delgado J.M.D., Oyedele L., Ajayi A., Akanbi L., Akinade O., Bilal M. et al. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*. 2019; 26:100868. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100868

22. Regona M., Yigitcanlar T., Xia B., Li R.Y.M. Artificial intelligent technologies for the construction industry: how are they perceived and utilized in Australia? *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2022; 8(1):16. DOI: 10.3390/joitmc8010016

23. Gorbova I.N., Avanesova R.R., Musaev M.M. Digital transformation of the Russian construction industry. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023; 2(55):46-51. EDN EDFXIZ. (rus.).

24. Kashevarova G.G. “Artificial intelligence” or “Logical discussion and reasonable solutions” in technical diagnostics of construction projects. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 4:166-180. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-166-180. EDN SYDNNW. (rus.).

25. Chudaeva A.A., Baryshev D.V. Incorporation of digital technologies into construction: current situation and prospects. *Theory and Practice of Social Development*. 2023; 6(182):198-205. DOI: 10.24158/tipor.2023.6.25. EDN SXCDXC. (rus.).

26. Hunde B.R., Woldeyohannes A.D. Future prospects of computer-aided design (CAD) : a review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. *Results in Engineering*. 2022; 14:100478. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100478

27. Oluleye B.I., Chan D.W., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review. *Sustainable Production and Consumption*. 2023; 35:509-524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002

28. Levin B.A., Piskunov A.A., Poliakov V.Yu., Savin A.V. Artificial intelligence in engineering education. *Higher Education in Russia*. 2022; 31(7):79-95. DOI: 10.31992/0869-3617-2022-31-7-79-95. EDN KCNAPJ. (rus.).

29. Hanafy N.O. Artificial intelligence’s effects on design process creativity: “A study on used A.I. Text-to-Image in architecture”. *Journal of Building Engineering*. 2023; 80:107999. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107999

30. Ko J., Ennemoser B., Yoo W., Yan W., Clayton M.J. Architectural spatial layout planning using artificial intelligence. *Automation in Construction*. 2023; 154:105019. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105019

Received September 20, 2024.

Adopted in revised form on October 1, 2024.

Approved for publication on November 14, 2024.

B I O N O T E S: **Dmitrii V. Slepushkin** — postgraduate student; **Moscow Innovation University**; 10 Krasnobogatyrskaya st., Moscow, 107564, Russian Federation; SPIN-code: 4234-0485, ID RSCI: 1260200; dv737@mail.ru;

Dmitrii Yu. Burlov — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor; **Moscow Financial and Industrial University “Synergy”**; 80 B, Leningradsky prospekt, Moscow, 125315, Russian Federation; SPIN-code: 3365-5590, ID RSCI: 282537, ORCID: 0009-0008-5269-635; budim2022@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Dmitrii V. Slepushkin — idea, collection of material, processing of material, writing of the source text, final conclusions.

Dmitrii Yu. Burlov — scientific leadership, research concept.

The authors declare no conflict of interest.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 378.095

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.456-463

История образования Московского практического строительного института

Юлия Викторовна Посвятенко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. История каждого вуза имеет свою уникальность и связана с историческими событиями, происходившими в стране в тот или иной период. НИУ МГСУ имеет более чем 100-летнюю историю существования, но точная дата его преобразования во вуз была неизвестна. Рассматриваются исторические условия, связанные с реформированием системы профессионально-технического образования в условиях революционных перемен, вызванных Великой российской революцией 1917–1922 гг.

Материалы и методы. На основе литературы и архивных материалов, публикуемых впервые, из фондов НИУ МГСУ, Государственного архива Российской Федерации и Центрального государственного архива Московской области исследуется реорганизация 1-го Московского строительного техникума во вуз — Московский практический строительный институт. В основу исследования положены сравнительно-исторический, историко-генетический, историко-системный и ретроспективный методы, позволившие установить и проанализировать важные документы.

Результаты. Выявлены факты, свидетельствующие о большом внимании руководства Наркомпроса к работе 1-го Строительного техникума в Москве: оплате труда преподавателей на уровне вузов, организации снабжения техникума как «ударного», всеми необходимыми ресурсами, создании кафедр, соответствующих втузовской структуре, изменении статуса техникума на новый тип вуза — практический институт.

Выводы. Формирование Московского практического строительного института было инициировано на уровне Главпрофобра Наркомпроса в связи с важностью для молодой советской республики решения проблем подготовки профессиональных кадров инженеров-строителей для обеспечения кадрами запланированных преобразований в стране на основе плана ГОЭЛРО. Документы, свидетельствующие о дате образования нового вуза 08.12.1920, открывают возможности для дальнейших исследований его развития.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный техникум, ударный техникум, вуз, Московский практический строительный институт (МПСИ), Московский инженерно-строительный институт (МИСИ), Московский государственный строительный университет (МГСУ), Главпрофобр, Моспрофобр, М.К. Приоров, В.Н. Образцов, З.Н. Шишкин, Е.Р. Бриллинг

Благодарности. Автор выражает благодарность коллегам за помощь в оформлении статьи и анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Посвятенко Ю.В. История образования Московского практического строительного института // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 456–463. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.456-463

Автор, ответственный за переписку: Юлия Викторовна Посвятенко, PosvyatenkoYV@mgsu.ru.

History of the Moscow practical construction institute

Yulia V. Posvyatenko

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

ABSTRACT

Introduction. The history of each university has its own uniqueness and is connected with historical events that took place in the country in this or that period. NRU MGSU has more than 100-year history of its existence, but the exact date of its transformation into a university was unknown. The historical conditions related to the reforming of the system of vocational education in the conditions of revolutionary changes caused by the Great Russian Revolution of 1917–1922 are considered.

Materials and methods. On the basis of literature and archival materials, published for the first time, from the fonds of the National Research University of Moscow State University, the State Archive of the Russian Federation and the Central State Archive of the Moscow Region the reorganization of the 1st Moscow Construction Technical School into the Moscow Practical Construction Institute is investigated. The research is based on comparative-historical, historical-genetic, historical-systemic and retrospective methods, which allowed to identify and analyze important documents.

Results. The facts testifying to the great attention of the People's Commissariat of Education of the RSFSR leadership to the work of the 1st Construction Technical School in Moscow were revealed: the payment of teachers' labour at the level of higher education institutions, the organization of supplying the technical school as a "strike" with all necessary resources, the creation of departments corresponding to the university structure, the change of the technical school status to a new type of university-practical institute.

Conclusions. The formation of the Moscow Practical Construction Institute was initiated at the level of General Directorate of Vocational Education of the People's Commissariat of Education in connection with the importance for the young Soviet republic of solving the problems of training professional staff of civil engineers for the planned transformations in the country on the basis of the State Plan for Electrification of Russia. Documents showing the stages and date of formation of the new university on December 8, 1920, open possibilities for further research of its development in 1921.

KEYWORDS: construction technical school, impact college, vtuz, Moscow Practical Construction Institute (MPCI), Moscow Institute of Civil Engineering (MISI), Moscow State Construction University (MGSU), Glavprofobr, Mosprofobr, M.K. Priorov, V.N. Obratsov, Z.N. Shishkin, E.R. Brilling

Acknowledgments. The author would like to thank the editorial board for their help in the design of the paper and anonymous reviewers.

FOR CITATION: Posvyatenko Yu.V. History of the Moscow practical construction institute. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):456–463. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.456-463 (rus.).

Corresponding author: Yulia V. Posvyatenko, PosvyatenkoYV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях Первой мировой войны и последствий революционных событий 1917 г., когда большевики пришли к власти, в социально-экономическом развитии страны происходили изменения, которые резко обострили потребность в квалифицированных кадрах. Для восстановления экономики и нового этапа развития всех отраслей народного хозяйства, реализации плана ГОЭЛРО не хватало инженеров. Важную роль в реализации намеченных целей имело увеличение числа инженеров-строителей. Советское руководство стремилось организовать и наладить массовую подготовку инженеров и квалифицированных работников среднего звена в максимально сжатые сроки. Все вопросы, связанные с деятельностью образовательных учреждений, были пересмотрены с позиций новых задач, что отразилось и на их реорганизации.

В Москве в дореволюционный период существовало несколько учебных заведений, которые готовили инженеров-строителей, но их усилий было недостаточно для реализации столь масштабных проектов как план ГОЭЛРО. Кроме того, позиция части руководства и преподавателей по отношению к предлагаемой системе массовой подготовки инженеров и тем более реорганизации деятельности по новому вузовскому уставу вызывала острые дискуссии и конфликтные ситуации. В результате реформирование системы высшего, в том числе инженерного образования займет более десятилетия, в ходе которого появятся новые решения и новые вузы, нацеленные на выполнение поставленных планов.

Известен факт, что в 1946 г. Московский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева (МИСИ) награжден за выдающиеся заслуги и в связи с 25-летием со дня основания орденом Трудового Красного Знамени, поэтому традиционно юбилей вуза отсчитываются с 1921 г. Вместе с тем точных сведений о времени образования Московского практического строительного института (МПСИ), который считается предшественником МИСИ – МГСУ, не было.

Целью исследования стало изучение обстоятельств и времени образования МПСИ на основе из-

учения архивных материалов, дополнение и уточнение имеющихся в литературе данных.

Историография вопроса об образовании практических институтов рассмотрена в публикациях их современников, советских и партийных государственных деятелей, участников реформ, оценивающих их результаты и характеризовавших существующие проблемы, связанные с функционированием этих институтов в середине 1920-х гг. [1, 2]. В юбилейных изданиях МГСУ приводится информация о реорганизации техникума в МПСИ и его дальнейшей судьбе [3–5]. Общие сведения о создании практических институтов в РСФСР встречаются в исследованиях деятельности Главного комитета профессионально-технического образования (Главпрофобр) и его губернских подразделений [6, 7]. Значительные сведения о предшественниках МПСИ представлены в статьях Т.Л. Пантелеевой, основанных на широком привлечении архивных материалов, позволяющих понять степень соответствия московских училищ возможной реорганизации их в практические институты [8–10]. Однако точных сведений о деталях смены статуса базового техникума и превращении его в практический институт в литературе не представлено.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для более детального выяснения локации архивных материалов, изучения исторического контекста этих изменений изучены архивные материалы НИУ МГСУ, Государственного архива Российской Федерации (ГА РФ) и Центрального государственного архива Московской области (ЦГА МО).

В основу исследования положены сравнительно-исторический, историко-генетический и историко-системный методы, которые позволили проследить последовательные изменения ситуации в средних образовательных строительных учреждениях Москвы на фоне происходивших политических изменений в стране. На основе историко-типологического метода исследовались документы, связанные с деятельностью Главпрофобра и Моспрофобра и их взаимодействием с подведомственными профессионально-техническими образовательными учреждениями. Для поиска сведений об изменениях

в правовом статусе учреждений использован ретроспективный метод.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Подготовкой практико-ориентированных работников для все расширяющейся сферы строительства в имперский период истории России занимались учреждения среднего профтехобразования, представленные многочисленными частными курсами, средними училищами, а также заведениями, созданными при участии Русского технического общества. Все они отличались по срокам обучения, программам, преподавательскому составу и в постреволюционный период многие из них продолжили свою работу. Среди них были и предшественники МИСИ – МГСУ:

1. Первое среднее Московское строительно-техническое училище инженера М.К. Приорова (1905), получившее казенные права с выдачей диплома государственного образца в 1910 г., позднее преобразованное в училище Общества распространения строительных знаний (1915), Общества распространения знаний и строительной техники под руководством П.А. Маматова (2-я Мещанская, д. 6) [9 л., с. 238]. Существовавшие при этом училище с 1897 г. первые Московские строительные курсы М.К. Приорова (1897) (Б. Никитская, д. 5) после октября 1917 г. также реорганизованы и позже вошли в состав института.

2. Училище Товарищества московских инженеров и педагогов (1907) с вечерними курсами для взрослых (1907) во главе с В.Н. Образцовым также получило широкую известность в Москве, добилося высокого уровня оценки своей деятельности и в короткие сроки в 1911 г. получило казенные права, в том числе правительственные субсидии [10 л., с. 237]. В условиях Первой мировой войны и начавшегося революционного кризиса 1917 г. училище было преобразовано в Среднее политехническое училище инженеров и педагогов (в начале 1917 г.) с вечерними политехническими курсами со строительной направленностью (Мясницкая, д. 36) под руководством инженера З.Н. Шишкина. Оно сохранилось и будет реорганизовано уже при советской власти в 1920 г. в первый Московский строительный техникум [4]. Именно первый строительный техникум станет формальным предшественником Московского практического строительного института во главе с ректором З.Н. Шишкиным. В.Н. Образцов останется среди преподавателей дорожного отделения и наряду с работой в других вузах будет всячески помогать развитию училища.

Весной 1920 г. в результате реализации основных положений реформы высшей технической школы было положено начало и новому типу втуз – практическим институтам. Создание практических институтов с трехгодичным сроком обучения могло решить проблему быстрой подготовки инженерных кадров, которые должны быть готовы руководить текущей деятельностью предприятий от рядовых тех-

нических отделов до главных инженеров. Создание практических институтов, как отмечалось в одном из писем Главпрофобра, «должно явиться поворотным моментом в деле пробуждения промышленности» [11]. Преобразование первого Строительного техникума с четырехлетним обучением в практический строительный институт происходило поэтапно и связано с разными обстоятельствами.

Анализ некоторых архивных личных дел студентов и сотрудников, среди которых были и личные листки по учету кадров преподавателей МПСИ, показал, что среди них встречаются справки, выданные преподавателям для разных нужд и удостоверяющие, что они работают в МПСИ и датируются первыми месяцами 1921 г. [12]. В результате дальнейших поисков, основанных на подведомственности учебных заведений Москвы Наркомату Просвещения РСФСР, а в нем Главпрофобру отделу профессионально-технического образования и далее его местным подразделениям, большинство учебных заведений Москвы подчинялись подотделу профессионально-технического образования (Моспрофобр) Московского отдела народного образования (МОНО) [6], в архивном фонде которого были выявлены документы, свидетельствующие о том, что с декабря 1920 г. МПСИ формально юридически уже существовал. При этом необходимо учитывать, что в 1917 – начале 1920-х гг. обеспечение сохранности документов не было налажено должным образом, многие документы утрачены. Часть сохранившихся документов имеет плохое качество (выцвела печать) или исполнена рукописно для последующей печати. Делать выводы о юридически значимых актах приходится на основе сохранившейся первичной текущей документации, обладающей необходимыми реквизитами.

Обстановка в стране не могла способствовать успехам в развитии профтехобразования. В отчетах Моспрофобра за 1918–1921 гг. отмечается, что из-за призыва юношей на военную службу, ухудшающегося продовольственного снабжения, часто при полном отсутствии какого-либо топлива, почти вся учебная работа в школах фабрично-заводского ученичества замирала [13]. Об аналогичной тяжелой ситуации писал и директор училища З.Н. Шишкин, когда просил вернуть мобилизованных слушателей и преподавателей, организовывал для них жилье, билеты в баню, покупку дров, учебники и т.п. Тем не менее училище даже при температуре в аудиториях на Мясницкой, 36 ниже нуля в период зимы 1919 г. продолжало свою деятельность [14].

Из выявленных документов следует, что летом 1920 г. постановлением Главпрофобра был создан ограниченный список «ударных» учреждений для снабжения их всем необходимым в 1920–1921 учебном году, и включенный в него техникум 23.09.1920 запрашивали об имеющихся потребностях. 12.10.1920 Моспрофобр извещал руководство техни-

кума, что «для распределения между преподавателями, исполняющими свои обязанности, отпущено 20 продовольственных пайков». Письмо в разъездную службу с просьбой выделить годовые книжки на проезд трем должностным лицам написано от «1-го Ударного Строительного техникума» [15 л., с. 67, 101]. В 1919–1920 гг. Главпрофобр было введено положение о социальном обеспечении учащихся в учреждениях профтехобразования [16]. Оно имело огромное значение, так как все они ощущали на себе дефицит продуктов питания, жилья, дров, канцелярских принадлежностей, одежды, транспортных услуг и т.п. условий для продолжения нужной для общества деятельности, сохранения здоровья и готовности продолжать получение образования. В письме от 01.12.1920 Моспрофобр разъясняло руководству, что в распределении продуктов, предоставленных учащимся техникума, должны принимать участие учащиеся и заведующий хозяйственной частью. Помимо этого, из письма Президиума от 16.12.1920 следует, что он просит выделить для 500 учащихся техникума крайне необходимые пособия: бумагу (ватман, слошовую, александрийскую, профильную, писчую; карандашей тушевалых, простых и разных; готовален; линеек и кальки). Заявка была выполнена в течение недели [15 л., с. 84–101]. Исходя из этих сведений, мы видим, что наличие внимания вышестоящих органов к поддержке обучающихся и преподавателей первого Московского строительного техникума свидетельствовало о важности выполняемой учебным заведением миссии.

В письме З.Н. Шишкина, датированном июлем 1919 г., указывалось, что в училище было 4 отделения — архитектурное, дорожно-строительное, гидротехническое и торфяное. Кроме того, имелась большая архитектурная и техническая библиотека по всем четырем специальностям, учебные кабинеты: геодезии, рисования, истории архитектуры и физической технологии. В училище еще был большой модельный музей по всем специальностям [17].

В обнаруженной выписке из заседания бюро Секции профессионально-технического образования Наркомпроса от 21.10.1919 (существовал вплоть до преобразования в Главпрофобр по декрету от 29.01.1920) за № 174 указывалось (рис. 1), что слушался вопрос о приравнении 1-го Московского строительного техникума бывшего Политехнического училища к высшим учебным заведениям. Было решено «отнести 1-й Московский строительный техникум в отношении оплаты труда к разряду высших учебных заведений без профессорских кафедр» [15 л., с. 18].

В дальнейшей переписке на несохранившийся запрос отдел Секции профессионально-технического образования сообщает исполкому 1-го Строительного техникума, что согласно Постановлению Бюро Секции ПТО Наркомпроса № 174 от 21.10.1919 техникум уже отнесен к вузам по оплате труда [15 л., с. 24]. Надо полагать, что основания для принятия такого решения базировались на анализе учебных программ училища, его учебной базы и педагогического состава, в числе которого было немало вузовских преподавателей, а также инженеров, имеющих за плечами большой опыт практической работы.

Однако, несмотря на приравнение по зарплате к вузам, еще осенью 1919 г. в техникуме имелись лишь отделения и не было кафедр, соответствовавших структуре высшей школы, поэтому для реализации заявленной цели было необходимо заметно реформатировать учебное заведение. Решение вопроса об этом затянулось почти на год. Вероятно, это связано не только с кризисной для республики ситуацией, сложившейся в условиях гражданской войны и суровой зимой, но и с дискуссиями во власти о развитии профтехобразования, разработкой положения о практических институтах и стремлением губернских отделов народного образования быть более автономными относительно Главпрофобра [7]. Архивные документы свидетельствуют, что эта работа была продолжена на основе предложений руководства техникума и его преподавателей.

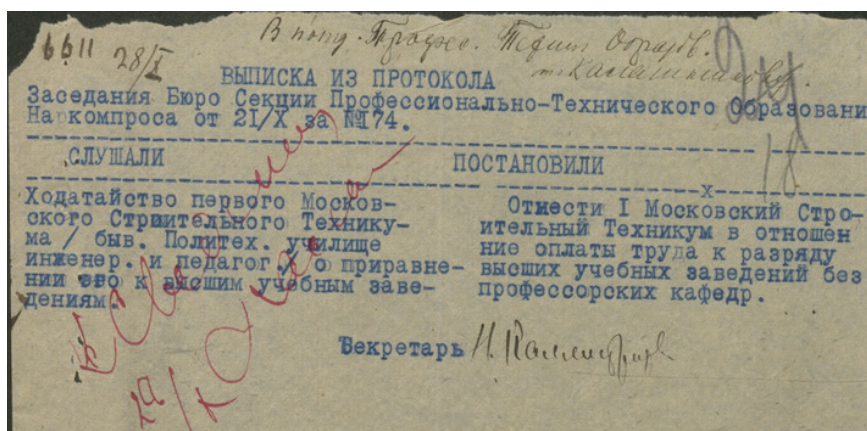


Рис. 1. Решение о приравнении техникума к вузам по оплате труда

Fig. 1. Decision on equating technical school with universities in terms of labour remuneration

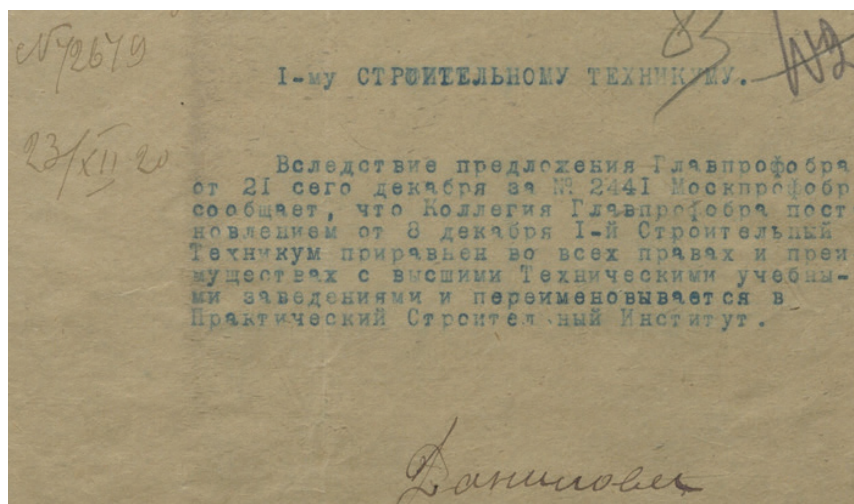


Рис. 2. Решение о переименовании техникума в Практический строительный институт

Fig. 2. Decision to rename the technical school into the Practical Construction Institute

В послании от 30.10.1920, подписанном Председателем Президиума техникума Е.Р. Бриллином, указано, что «на основании постановления Главного Комитета Профессионального Технического образования от 8 сентября 1920 г. по вопросу о предоставлении техникумам права иметь кафедры, Президиум Первого Московского Строительного техникума согласно постановлению Совета имеет представить нижеследующие соображения... профессуры желательно наметить для наибольшего числа наиболее важных предметов преимущественно строительного характера с целью привлечь на эти предметы лучшие силы ...». Совет техникума отмечал, что профессора должны иметь тесную связь с техникумом и выполнять в нем достаточно большую работу «... минимум 8 часов в неделю» [15 л., с. 71–72]. 20 ноября 1920 г. Е.Р. Бриллиг адресовал в подотдел Профессионально-технического образования МОНО дополнения в форме списка кафедр. Некоторые из них вызвали вопросы в вышестоящей инстанции, например, возник вопрос о введении кафедры физико-химического и естественно-ботанического цикла, а также «... чем вызвано создание кафедр по архитектурному проектированию и рисованию...» [15 л., с. 76].

По общеобразовательным предметам для всех 4 отделений техникума предлагалось организовать три кафедры: по математике, физико-химическому циклу и геодезии. Из специальных предметов для нескольких отделений предлагалось создать кафедру по строительному искусству для трех отделений. Кафедру строительной механики предполагалось сформировать одну для двух отделений — архитектурного и дорожного и отдельную для гидравлического.

По архитектурному отделению предлагалось организовать кафедры: гражданской архитектуры, архитектурного проектирования, истории архитектуры, ордера и формы, начертательной геометрии, перспективы и тени, рисования.

Для дорожного отделения предполагалось создать кафедры: мосты, железные дороги, водяные сообщения или шоссейные и грунтовые дороги.

Для гидравлического и торфяного отделения предлагались кафедры: гидравлика, естественно-ботанический цикл, сельскохозяйственная гидротехника, общая гидротехника или обводнение, торфоведение (и торфодобыывание) [15 л., с. 73].

Проведенные структурные изменения реализовывались постепенно. На этом фоне в конце декабря руководство техникума получило письмо (рис. 2) из Моспрофобра № 72679 о том, что «Вследствие предложения Главпрофобра от 21 сего декабря за № 2441 Моспрофобр сообщает, что Коллегия Главпрофобра постановлением от 8 декабря 1-й Строительный Техникум приравнен во всех правах и преимуществах с высшими Техническими учебными заведениями и переименовывается в Практический Строительный институт» [15 л., с. 83].

Таким образом, приравняв 1-й Московский строительный техникум сначала по оплате труда преподавателей, потом изменив структуру учебного заведения, коллегия Главпрофобра приняла окончательное решение о преобразовании его во ВТУЗ с соответствующим наименованием 08.12.1920, отослано сообщение из Главпрофобра 21 декабря, получено в МОНО, судя по отметкам на документе, 23 декабря и послано в техникум нижестоящим Моспрофобром и получено адресатом 24.12.1920 за № 72679.

Имеющиеся возможности для подготовки инженерных кадров в 1-м строительном техникуме были достаточными, о чем свидетельствует постановление Главпрофобра. Поэтому после получения нового статуса получены дальнейшие распоряжения от Моспрофобра, которые завершили начатые структурные изменения с точки зрения наименования подразделений и штатных должностей. В письме, адресованном уже

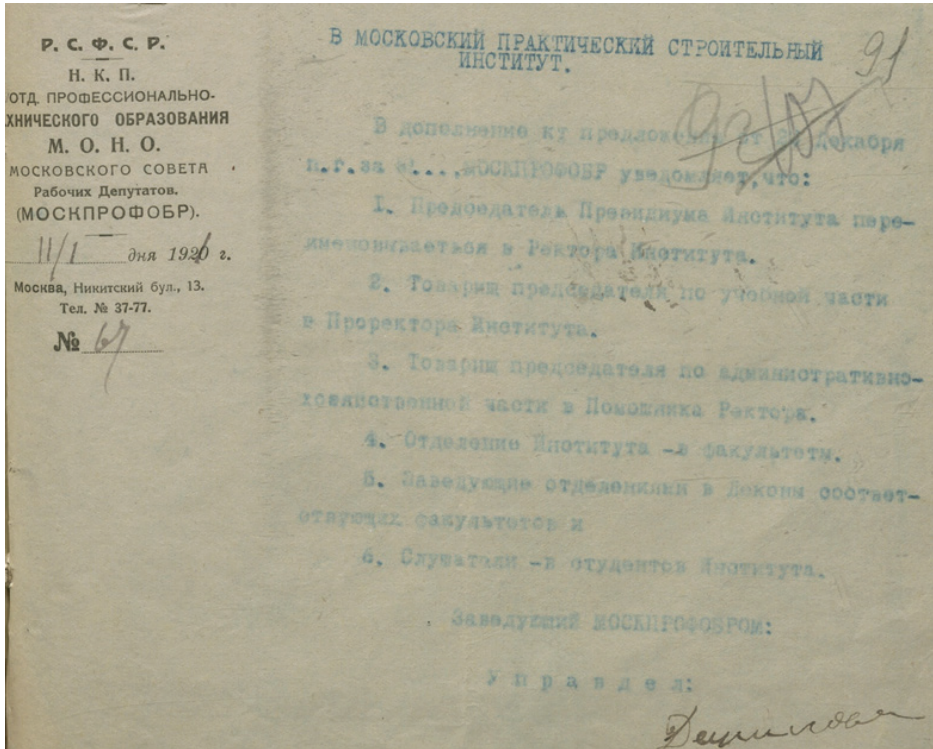


Рис. 3. Письмо 11 января 1921 г.
Fig. 3. Letter of January 11, 1921

- в Московский практический строительный институт от 11.01.1921, сообщается, что отныне (рис. 3):
1. Председатель Президиума института переименовывается в ректора института.
 2. Товарищ председателя по учебной части — в проректора института.
 3. Товарищ председателя по административно-хозяйственной части — в помощника ректора.
 4. Отделения института — в факультеты.

5. Заведующие отделениями — в деканы соответствующих факультетов.
6. Слушатели — в студентов института [15 л., с. 91].

Таким образом, в конце 1920 г. завершился процесс создания еще одного нового практического института — МПСИ, призванного готовить инженеров узкой специализации в области строительства. На письме от 25.02.1921 [15 л., с. 97] несмотря на вы-



Рис. 4. Штамп и печать МПСИ на письме ректора З.Н. Шишкина
Fig. 4. Stamp and seal of MPSI on the letter of Rector Z.N. Shishkin

цветшую информацию видны штамп и печать нового втуза (рис. 4).

Как отмечала В.Н. Яковлева (заведующий Главпрофобром в 1922–1924 гг.), сначала образование практических институтов в регионах шло отчасти стихийно, их число к 1922 г. выросло до 60 [1], в результате чего пришлось наводить порядок и сокращать их численность [2]. Далеко не все эти институты соответствовали требованиям положения о втузах, поэтому наблюдались частые реорганизации. Численность сохранившихся втузов, подведомственных индустриально-техническому отделу Главпрофобра, тоже сокращалась: в 1921 г. она составляла 28 институтов, а в 1922 г. — 20 [18]. МПСИ расширится за счет слияния с другими образовательными учреждениями. Дальнейшая судьба втузов будет развиваться разными путями, но это предмет отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что в сочетании с ранее выявленными сведениями о выданных преподавателям справках о работе в данном институте можно понять, что формирование МПСИ было инициировано на уровне Главпрофобра Наркомпроса в связи с важностью для молодой советской республики реше-

ния проблем подготовки профессиональных кадров инженеров-строителей для обеспечения ведущих и запланированных экономических преобразований. Пройдя с осени 1919 г. ряд этапов реструктуризации, 1-й Строительный техникум Москвы был преобразован и получил статус втуза — Практический строительный институт в декабре 1920 г.

Вопрос о том, какую дату считать днем рождения нового втуза, необходимо решать исходя из правовой ситуации с его подведомственностью и указанием Моспрофобра на решение вышестоящего органа управления профтехобразованием республики 08.12.1920. В восприятии постоянно поддерживавших контакты руководства учебного заведения и губернского подразделения, ответственного за проведение государственной политики в этой области, а также на основе сохранившихся писем З.Н. Шишкина об исполнении постановления, дата 24.12.1920 позиционировалась как главная.

Материалы исследования дополняют сведения об истории формирования на основе 1-го Строительного техникума втуза, образовавшегося в декабре 1920 г. — Московского практического строительного института. Они позволяют расширить источниковую базу для дальнейшего изучения истории НИУ МГСУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлева В.Н. Общее положение профессионального образования в РСФСР // Красная новь. 1922. № 5. С. 175–191.
2. III-й Всероссийский Съезд Зав. Губпрофобра. Москва 4–9 октября 1922 г. М.: Типография ГПУ, 1923. 79 с.
3. Люшин С.П. МПСИ – МГСУ — 75 лет: МПСИ – МГСУ. Основные этапы развития: краткий исторический очерк. М., 1996. 123 с.
4. Молокова Т.А. Московский государственный строительный университет: история и современность. 80-летию МПСИ – МГСУ посвящается. М.: Издательство АСВ, 2001. 384 с. EDN ULYIPL.
5. Молокова Т.А., Королев М.В.Р. МПСИ – МГСУ: традиции и новое развитие: к 85-летию университета. М.: Издательство АСВ, 2006. 192 с. EDN QNMKIZ.
6. Ларина Е.В. Из истории формирования системы профессионально-технического образования в Советской России в начале 1920-х годов (на материалах г. Москвы и Московской губернии) // Вестник Костромского государственного университета. 2019. Т. 25. № 4. С. 49–53. DOI: 10.34216/1998-0817-2019-25-4-49-53. EDN BFFJAP.
7. Силин А.В. Советская парадигма профессионального образования в 1917–1920 годах: этапы эволюции // Вестник Поморского университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. 2011. № 6. С. 41–48. EDN ORGPLL.
8. Пантелеева Т.Л. К истории строительного образования: разработка учебных планов строительных училищ в начале XX века // Приволжский научный журнал. 2013. № 4 (28). С. 185–189. EDN RPUYYJ.
9. Пантелеева Т.Л. К 105-летию первого Московского строительного-технического училища // Вестник МГСУ. 2010. № 4–3. С. 90–94. EDN RTSCRB.
10. Пантелеева Т.Л. Товарищество преподавателей как новая форма организации строительного образования в Москве в начале XX в. // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 234–240. EDN PCWGIV.
11. ГА РФ. Ф. А-1565. Оп. 4. Д. 7. Л. 3.
12. Посвятенко Ю.В. Из истории Московского практического строительного института (к 100-летию НИУ МГСУ) // Общество: философия, история, культура. 2022. № 3 (95). С. 136–141. DOI: 10.24158/fik.2022.3.22. EDN IAKIPF.
13. Марченков А.В. История развития профессионального образования в России (1917–конец 1950-х гг.) // Тенденции развития науки и образования. 2016. № 11–1. С. 42–47. DOI: 10.18411/lj2016-2-12. EDN VONQZV.
14. ЦГАМО. Ф. 965. Оп. 1. Д. 46. Л. 57–58, 70; Д. 127. Л. 12–15, 35–36.
15. ЦГАМО. Ф. 965. Оп. 1. Д. 46.
16. ГА РФ. Ф. А-1565. Д. 25.
17. ЦГАМО. Ф. 965. Оп. 1. Д. 229. Л. 1–2.
18. ЦГАМО. Ф. 965. Оп. 10. Д. 24. Л. 474.

Поступила в редакцию 25 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 29 января 2025 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

О Б А В Т О Р Е : **Юлия Викторовна Посвятенко** — кандидат исторических наук, доцент, доцент кафедры социально-гуманитарных наук и технологий; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; PosvyatenkoYV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Yakovleva V.N. General position of professional education in the RSFSR. *Krasnaya Nov.* 1922; 5:175-191. (rus.).
2. *III All-Russian Congress of Heads of Gubprofboras. Moscow 4–9 October 1922.* Moscow, GPU Tipography, 1923; 79. (rus.).
3. Lyushin S.P. *MISI – MGSU — 75 years: MISI – MGSU. Main stages of development: Main stages of development: A Brief Historical Sketch.* Moscow, 1996; 123. (rus.).
4. Molokova T.A. *Moscow State Construction University: History and Modernity. Dedicated to the 80th anniversary of MISI – MGSU.* Moscow, ASV Publishing House, 2001; 384. EDN ULYIPL. (rus.).
5. Molokova T.A., Korolev M.V.R. *MISI – MGSU: traditions and new development: for the 85th anniversary of the university.* Moscow, ASV Publishing House, 2006; 192. EDN QNMKIZ. (rus.).
6. Larina Ye.V. On formation of the system of vocational education in Soviet Russia in the early 1920s (on the materials of Moscow and the Moscow province). *Vestnik of Kostroma State University.* 2019; 25(4):49-53. DOI: 10.34216/1998-0817-2019-25-4-49-53. EDN BFFJAP. (rus.).
7. Silin A. Soviet paradigm of vocational education in 1917–1920: stages of evolution. *Vestnik of Pomor University. Series “Humanitarian and Social Sciences”.* 2011; 6:41-48. EDN ORGPLL. (rus.).
8. Panteleeva T.L. To the history of building education: development of curricula of construction colleges at the beginning of the XX century. *Privolzhsky Scientific Journal.* 2013; 4(28):185-189. EDN RPUYYJ. (rus.).
9. Panteleeva T.L. The 105 anniversary of the first Moscow civil engineering college. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-3:90-94. EDN RTSCRB. (rus.).
10. Panteleeva T.L. A partnership of lecturers as a new organizational form of civil engineering education in Moscow in the early 20th century. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 8:234-240. EDN PCWGIV. (rus.).
11. SA RF. F. A-1565. In. 4. F. 7. P. 3. (rus.).
12. Posvyatenko Yu.V. From the history of the Moscow practical construction institute (to the 100th anniversary of NRU MGSU). *Society: Philosophy, History, Culture.* 2022; 3(95):136-141. DOI: 10.24158/fik.2022.3.22. EDN IAKIPF. (rus.).
13. Marchenkov A.V. History of the development of vocational education in Russia (1917 – late 1950s). *Trends in the Development of Science and Education.* 2016; 11-1:42-47. DOI: 10.18411/lj2016-2-12. EDN VOHQZV. (rus.).
14. CSAMR. F. 965. In. 1. F. 46. 57-58, 70; F. 127. 12-15, 35-36. (rus.).
15. CSAMR. F. 46. (rus.).
16. SA RF. F. A-1565. F. 25. (rus.).
17. CSAMR. F. 965. In. 1. F. 229. 1-2. (rus.).
18. CSAMR. In.10. F. 24. 474. (rus.).

Received December 25, 2024.

Adopted in revised form on January 29, 2025.

Approved for publication on January 31, 2025.

BI O N O T E S : **Yulia V. Posvyatenko** — Candidate of Historical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Social and Humanitarian Sciences and Technologies; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavlshoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; PosvyatenkoYV@mgsu.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

(наименование платежа)

Вестник МГСУ

(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

БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

(наименование платежа)

Вестник МГСУ

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О
плательщика _____

Адрес
плательщика _____

Сумма
платы
за

Сумма
платежа

3 822

 руб.

00

 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика _____

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



